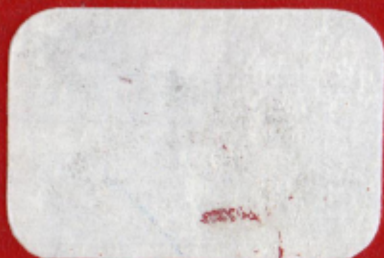
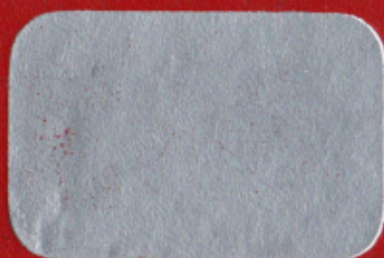
Н. Н. КУДРЯШОВ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КИНОСЪЕМКИ







Н.Н. КУДРЯШОВ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КИНОСЪЕМКИ

МОСКВА
«ИСКУССТВО»
1979

ББК 37.95
К88

К $\frac{32303\text{-}042}{025(01)\text{-}79}$ 135-78 4910030000

ОТ АВТОРА

...циальными называют документальные киносъемки, которые в отличие от ...чной требуют либо специальной аппаратуры, оптики, светофильтров, кино...ики, либо особых методик проведения съемочного процесса.

К специальным относят: скоростные, высокоскоростные и замедленные кино...мки; киносъемки мелких предметов в крупном масштабе и с больших удале...; киносъемки в поляризованном свете, в невидимых лучах, при низкой осве...нности и в темноте; киносъемки, сочетающиеся с оптическими и электронно...ическими приборами; киносъемки в необычных условиях, а также всевоз...жные научные регистрационные и измерительные киносъемки. Они находят ...менение во всех видах кинематографии: художественной, документальной, ...чно-популярной, учебной и научно-исследовательской.

При создании художественных кинопроизведений нередко используются ...ростные и замедленные киносъемки, которые в определенных драматургичес... ситуациях служат усилению эмоционального воздействия экранного изобра...ния на зрителя. Съемки в поляризованном свете, инфракрасных, ультрафиоле...ых лучах и свете фотолюминесценции дают возможность кинооператору на...ить новые изобразительные решения.

Для документальной кинематографии специальные киносъемки также имеют ...аловажное значение. Высокоскоростную киносъемку часто применяют, на...мер, чтобы дать возможность зрителям рассмотреть быстрые движения ...ртсменов, с помощью телеобъективов снимать удаленные объекты, показать ...цессы при очень низкой освещенности и т. д. Документальные кинофильмы ...мают в самых необычных условиях, требующих специальной аппаратуры, ...бого снаряжения и определенных методик съемочного процесса, например: ...водная киносъемка, киносъемка с самолетов, вертолетов и космических ко...блей, киносъемка при низкой температуре и т. д.

Самая обширная область применения специальных киносъемок — это учеб... и научно-популярная кинематография. Показ на экране многих процессов ...природе бывает невозможен без использования специальных методов кино...емки.

Кинематограф имеет неоценимое значение для экспериментальной науки, ко...ое определяется его замечательными и широко известными свойствами.

Киносъемка используется как метод научной документации и исследования. Киносъемочный аппарат фиксирует на кинопленку изображения движущихся предметов или картину всевозможных изменений.

В этой книге автор попытался дать широкому кругу творческих и инженерно-технических работников киностудий, студентов киновузов представление о современном состоянии специальных киносъемок для их успешного применения в производстве фильмов.

Глава 1

СКОРОСТНАЯ И ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КИНОСЪЕМКИ

Скоростной и высокоскоростной называют такие киносъемки, которые производят с частотой, превышающей нормальную частоту проекции кинофильма 24 *кадр/с*, благодаря чему на экране наблюдается замедленное движение.

Кратность k замедления движения на экране зависит от того, насколько частота киносъемки $n_с$ больше частоты проекции кинофильма $n_{пр}$, то есть

$$k = \frac{n_с}{n_{пр}}. \qquad (1\text{-}1)$$

Если, например, киносъемку произвести с частотой 600 *кадр/с*, а проецировать кинофильм с нормальной частотой 24 *кадр/с*, то движение, которое мы будем наблюдать на экране, будет замедлено в $^{600}/_{24}=25$ раз. Иными словами, процесс, длившийся в действительности одну секунду, будет протекать на экране в течение двадцати пяти секунд.

Скоростная и высокоскоростная киносъемки, замедляя течение времени на экране, позволяют подробно рассмотреть быстрые движения предметов и кратковременные физические процессы, которые наблюдать непосредственно невозможно.

Расчет необходимой кратности замедления и частоты киносъемки. Опытным путем установлено, что для подробного рассматривания движущихся объектов на экране нужно, чтобы скорость их не превышала 1*м/с,* а длительность физических процессов была не менее трех секунд.

Исходя из этих предпосылок и зная действительную скорость объекта, а также длительность кратковременного процесса, можно рассчитать необходимую кратность замедления движения и частоту киносъемки. Необходимой кратностью замедления движения называют отвлеченное число, показывающее, во сколько раз должна быть замедлена на экране скорость движения объекта или длительность процесса, чтобы стало возможно подробно рассмотреть быстрые движения или изменения снимаемого объекта на киноэкране.

Необходимая кратность замедления движения определяется соотношением:

$$k = \frac{v}{v_э}, \tag{1-2}$$

где v — действительная линейная скорость объекта; $v_э$ — линейная скорость изображаемого объекта на экране.

Полагая, что скорость движения изображения на экране должна быть равна 1 *м/с*, то

$$k = \frac{v}{1} = v. \tag{1-3}$$

Иными словами, необходимая кратность замедления движения объекта на экране равняется числу, выражающему действительную скорость объекта в метрах в секунду.

Пример 1. Зубья циркулярной пилы имеют линейную скорость 75 *м/с*. Для рассматривания процесса резания древесины циркулярной пилой необходимо, чтобы скорость движения зубьев пилы на экране равнялась 1 *м/с*.

Следовательно:

$$k = \frac{75}{1} = 75.$$

Необходимая кратность замедления времени протекания на экране быстрого процесса выражается формулой:

$$k = \frac{t_э}{t}, \tag{1-4}$$

где $t_э$ — время протекания снятого процесса на экране; t — действительная длительность процесса.

Так как время, необходимое для детального рассматривания на экране снятого процесса или явления должно быть равно 3 *с*, то формула (1-4) принимает вид:

$$k = \frac{3}{t}. \tag{1-5}$$

Пример 2. Летящая птица делает крыльями пять взмахов в секунду (один взмах за 0,2 *с*). Для детального рассматривания движений крыльев птицы необходимо, чтобы каждый взмах крыльев длился на экране в течение 3 *с*:

$$k = \frac{3}{0,2} = 15.$$

При сложных движениях объектов и при крупном масштабе изображения может потребоваться бóльшая кратность.

Рассчитав необходимую кратность замедления, определяют частоту киносъемки по формуле:

$$n_с = n_{пр} k, \tag{1-6}$$

где $n_с$ — частота киносъемки; $n_{пр}$ — частота проекции кинофильма; $к$ — необходимая кратность замедления.

Так как частота проекции звуковых кинофильмов равна 24 *кадр/с,* то формула (1—6) принимает вид:

$$n_с = 24 \cdot k. \tag{1-7}$$

Для научного анализа материалов скоростной и высокоскоростной киносъемок часто применяют замедленную кинопроекцию, что позволяет производить киносъемку с соответственно меньшей частотой. Частота проекции звуковых кинофильмов равна 24 *кадр/с.*

Для включения в звуковой фильм показа процесса резания древесины циркулярной пилой (см. пример 1) требуется частота киносъемки

$$n_с = 24 \cdot 75 = 1800 \text{ кадр/с},$$

а для показа движений крыльев летящей птицы (см. пример 2):

$$n_с = 24 \cdot 15 = 360 \text{ кадр/с}.$$

Необходимые кратности замедления движения, рассчитанные по формулам (1—3) и (1—5), и частоты киносъемки, рассчитанные по формуле (1—7), требующиеся для показа в кинофильме некоторых процессов и явлений, даны в табл. 1-1.

Расчет необходимой кратности замедления для киносъемки макетов. Часто нужно показать на экране эпизоды, которые трудно или невозможно создать и заснять в естественных условиях: горный обвал, разрушение крупного сооружения при землетрясении, пожар большого здания, бурю на море, крушение поезда, катастрофу самолета, столкновение автомобилей, разрушение моста и т. д.

Чтобы воспроизвести на экране такие сцены, используют макеты, которые представляют собой уменьшенные во много раз копии автомобилей, самолетов, поездов, различных сооружений и целых поселков, заводов, городов.

Для создания на экране впечатления правдоподобности происходящих в макетных сценах событий необходимо замедлить движения малоразмерных деталей макета, для чего применяют скоростную киносъемку.

Необходимая кратность замедления при съемке макетов, вытекающая из закона о свободном падении тел, будет:

$$k = \sqrt{\frac{1}{m}}, \tag{1-8}$$

где m — масштаб макета (отношение размеров миниатюрной модели к действительным размерам натурного объекта).

Частоту киносъемки $n_с$ определяют по формуле (1-7), которая в случае макетных сцен принимает вид:

$$n_с = 24\sqrt{\frac{1}{m}}. \tag{1-9}$$

Таблица 1-1

Необходимая кратность замедления движения и частота киносъемки, требующиеся для анализа на экране некоторых быстродвижущихся объектов и кратковременных процессов

Объект, процесс или явление	Скорость движения, *м/с*	Длительность, *с*	Кратность замедления, *к*	Частота съемки, *кадр/с*
Обычные движения человека	1	—	1	24
Раскрытие купола парашюта	—	4/5	4	96
Бегущий спортсмен-спринтер	10	—	10	240
Летящая птица (5 *взмах/с*)	—	1/5	15	360
Работа швейной машины (360 *стежок/мин*)	—	1/6	18	432
Автомобиль, движущийся со скоростью 90 *км/час*	25	—	25	600
Моргание глаз	—	1/10	30	720
Сверление металла (при вращении сверла 750 *об/мин*)	—	1/13	38	900
Резание металла на токарном станке	50	—	50	1 200
Резание древесины циркульной пилой	75	—	75	1 800
Разрыв автомобильной шины	—	1/100	300	7 200
Звуковая волна в воздухе	330	—	330	7 900
Летящая пчела (220 *взмах/с*)	—	1/220	660	15 840
Летящая пуля	800	—	800	19 200
Звуковая волна в воде	1500	—	1 500	36 000
Взрывная волна	4000	—	4 000	96 000
Волна сжатия в трескающемся стекле	5000	—	5 000	120 000
Электрическая искра в воздухе	—	1/200000	600 000	1 4400 000

Пределы скоростной и высокоскоростной киносъемок. Обычные киносъемочные аппараты рассчитаны для киносъемки с нормальной частотой 24 *кадр/с*, но многие 35-*мм* киноаппараты допускают повышение скорости съемки до 32—48 *кадр/с*, а 16-*мм* киноаппараты позволяют доводить частоту съемки до 64 *кадр/с*. Киносъемки обычными киноаппаратами с повышенной частотой до 32—64 *кадр/с* принято называть ускоренными киносъемками.

Специальные киносъемочные аппараты с прерывистым движением кинопленки, имеющие быстроходные грейферные механизмы, дают возможность получать на 35-*мм* кинопленке до 300 *кадр/с*, а на 16-*мм* кинопленке — до 600 *кадр/с*. Такие киносъемки принято называть скоростными.

Киносъемки с более высокими частотами осуществляются высокоскоростными киноаппаратами, в которых кинопленка движется непрерывно. Получение резких изображений кадров в аппаратах с непрерывным движением кинопленки обеспечивается с помощью особых устройств — оптических компенсаторов или же посредством ультракоротких экспозиций, при которых смазанность изображения получается настолько ничтожно малой, что оказывается ниже предела разрешающей способности глаза.

В высокоскоростных киноаппаратах скорость непрерывного движения 35-*мм* кинопленки можно довести до 40 *м/с*, что дает возможность получить частоту съемки 2000 *кадр/с*. Узкую 16-*мм* кинопленку, имеющую меньшую массу, можно перематывать с одной бобины на другую со скоростью до 60 *м/с*. При такой скорости движения 16-*мм* кинопленки частота съемки достигает 8000 *кадр/с*, а на кинопленке 2×8 *мм* — до 16 000 *кадр/с*.

Этим исчерпываются возможности высокоскоростной киносъемки в получении кинофильмов, отвечающих кинематографическим нормативам на форматы кинокадров и расположение кинокадров на кинопленке относительно перфораций.

Узкая кинопленка имеет существенное преимущество перед 35-*мм* пленкой для скоростной и высокоскоростной киносъемок, так как она дает возможность получать значительно бóльшую частоту съемки, нежели кинопленка шириной 35 *мм*.

Частоту киносъемки можно увеличить, уменьшая высоту кадра, что предусмотрено в некоторых киноаппаратах с непрерывным движением кинопленки. Однако, уменьшая высоту кадра в два раза на 35-*мм* кинопленке, мы нарушаем кинематографический стандарт, увеличивая предельную частоту съемки лишь в два раза, то есть с 2000 до 4000 *кадр/с*. На 16-*мм* кинопленке, не нарушая кинематографического стандарта, можно получить частоту съемки 8000 *кадр/с*.

Дальнейшее увеличение частоты съемки осуществляется способами сверхскоростной съемки, которые рассматриваются в главе 2.

Скоростные киносъемочные аппараты с прерывистым движением кинопленки. В скоростных киносъемочных аппаратах с прерывистым движением кинопленки экспонирование светочувствительного слоя происходит в то время, пока кинопленка неподвижна. В этом заключено их главное преимущество, так как обеспечиваются условия для получения изображений высокой резкости, а сами кадры точно располагаются на кинопленке относительно перфораций. Эти аппараты позволяют применять объективы любых фокусных расстояний, включая широкоугольные и длиннофокусные.

Прерывистое продвижение кинопленки в фильмовом канале скоростных киноаппаратов осуществляется быстроходными грейферными механизмами, в которых все эксцентрики рассчитаны на получение синусоидального ускорения. Захват кинопленки производится большим числом зубьев грейфера (4—8 зубьев), чтобы равномерно распределить нагрузку на перемычки между перфорациями. Высокая точность изготовления и тщательная балансировка грейферного

механизма имеют первостепенное значение при изготовлении киносъемочного аппарата. Применение контргрейфера является обязательным ввиду того, что высокая частота продергивания кинопленки через фильмовый канал вызывает вибрации кинопленки и появление нерезкости изображения.

Скоростные киносъемочные аппараты, как правило, снабжаются обтюратором с переменным раскрытием или набором сменных обтюраторов с разными углами раскрытия, чтобы в необходимых случаях не допустить чрезмерного смазывания изображения быстродвижущихся объектов.

Продолжительность непрерывной работы скоростных киноаппаратов на предельной скорости имеет ограничение ввиду опасности повреждения грейферного механизма.

К кинопленке, используемой для съемки скоростными киноаппаратами, предъявляются повышенные требования в отношении геометрических размеров, то есть ширины и точности перфораций. Усадка кинопленки не должна превышать 0,2% от номинальных размеров. В остальном обращение со скоростными киноаппаратами с прерывистым движением кинопленки не отличается от правил работы с обычными киносъемочными аппаратами.

Наша отечественная промышленность изготовляет четыре модели скоростных киносъемочных аппаратов: ПСК-24М, 1-КСК, 1-СКЛ («Темп») — для 35-*мм* кинопленки и 70КСК — для 70-*мм* кинопленки. На киностудиях, в научно-исследовательских организациях используются также скоростные киноаппараты иностранного производства.

Высокоскоростные киносъемочные аппараты с непрерывным движением кинопленки. В высокоскоростных киносъемочных аппаратах кинопленка движется непрерывно, быстро перематываясь с подающей бобины на принимающую. Экспонирование кадров происходит на движущуюся кинопленку.

Как же получить резкими (не смазанными) изображения кинокадров на движущейся с постоянной скоростью кинопленке?

Первый, наиболее простой способ заключается в экспонировании кинопленки ультракороткими выдержками, при которых нерезкость изображения ничтожно мала и оказывается ниже предела разрешающей способности глаза. Ультракороткие выдержки в высокоскоростных киноаппаратах получают с помощью быстро вращающегося диска с узкими щелями (щелевой способ) или же посредством синхронизированного с движением кинопленки освещения снимаемого объекта. Синхронно вспыхивают электрические искры или импульсные лампы (способ искрового или импульсного освещения), при этом объект съемки должен быть защищен от освещения посторонним светом.

Второй способ состоит в использовании различных устройств оптической компенсации.

Оптическая компенсация заключается в том, что оптическому изображению, образованному объективом в плоскости светочувстви-

тельного слоя кинопленки, с помощью движущихся оптических элементов сообщается движение, равное по скорости и направлению движению кинопленки. Или, иными словами, кадры на кинопленке получаются резкими потому, что оптическое изображение во время экспозиции движется в том же направлении и с той же скоростью, что и кинопленка.

Оптическая компенсация с помощью вращающейся плоскопараллельной стеклянной пластинки или призмы. Если на пути луча поместить плоскопараллельную стеклянную пластинку (рис. 1-1), то

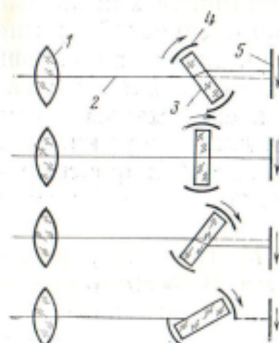


Рис. 1-1. Оптическая компенсация с помощью вращающейся плоскопараллельной стеклянной пластинки: 1 — объектив; 2— луч; 3— плоскопараллельная пластинка; 4 — обтюратор; 5 — кинопленка

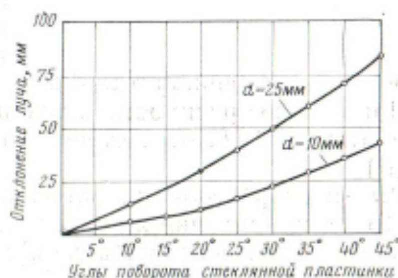


Рис. 1-2. Зависимость величины смещения луча от углов поворота стеклянной пластинки разной толщины

при повороте ее луч не изменяет направления, но будет смещен в направлении, показанном стрелкой. Величина смещения зависит от угла падения, показателя преломления и толщины пластинки согласно формуле:

$$ss' = \frac{d \sin(i - i')}{\cos i'}, \qquad (1\text{-}10)$$

где ss' — величина смещения; i — угол падения луча; i' — угол преломления луча; d — толщина стеклянной пластинки.

Зависимость величины смещения луча от углов наклона стеклянной пластинки с показателем преломления 1,516 приведена на рис. 1-2. Как видно из кривых, соответствующих двум пластинкам разной толщины ($d=10$ *мм* и $d=25$ *мм*), при углах наклона пластинки до 15° смещение луча пропорционально углам наклона. Следовательно, для оптической компенсации можно использовать вращение стеклянной пластинки в пределах угла поворота до 30°.

В высокоскоростных киноаппаратах обычно используют призмы с плоскопараллельными гранями, действующие так же, как и пластинка.


Рис. 1-3. Высокоскоростной киноаппарат СКС-1М

Стеклянная пластинка или призма должна быть вмонтирована в цилиндрический обтюратор, который ограничивает используемый угол поворота и одновременно определяет выдержку при экспонировании кадров. В некоторых киноаппаратах применяется дисковый обтюратор, работающий согласованно с компенсирующей пластинкой или призмой.

Способ оптической компенсации с помощью вращающейся призмы получил наибольшее применение в современных высокоскоростных киноаппаратах с непрерывным движением кинопленки.

Наибольшее распространение получили высокоскоростные киноаппараты СКС-1М отечественного производства и «Пентацет-16» (ГДР).

Высокоскоростной киноаппарат СКС-1М (рис. 1-3) рассчитан для 16-*мм* кинопленки и кинопленки 2×8 *мм*. В 16-*мм* варианте аппарат имеет компенсирующую призму с четырьмя гранями и может давать частоту съемки до 4000 *кадр/с* при полном формате кадра. В варианте 2×8 *мм* в аппарат устанавливается призма с восьмью гранями, а максимальная частота съемки может быть доведена до 8000 *кадр/с*.

Оптическая схема киноаппарата СКС-1М изображена на рис. 1-4. Непрерывное транспортирование кинопленки в аппарате осуществляется одним зубчатым барабаном большого диаметра. Фильмового канала аппарат не имеет, кинопленка экспонируется на зубчатом барабане. Установка кадра и фокусирование изображения производится через визирную лупу непосредственно по кинопленке или на помещенной вместо нее матированной пленке. На аппарат могут быть установлены разные объективы. Обычный комплект состоит из двух объективов: $f=50$ *мм*, 1 : 2 и $f=35$ *мм*, 1 : 2.

Выдержка при экспонировании каждого кадра в 16-*мм* варианте киноаппарата равна 0,8 времени смены кадра, то есть

$$t = 0{,}8\ n^{-1}, \qquad (1\text{-}11)$$

где n — частота киносъемки.

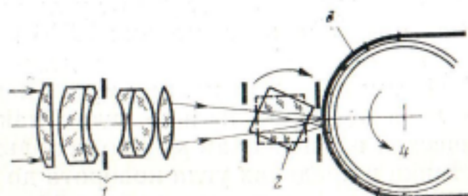


Рис. 1-4. Оптическая схема киноаппарата СКС-1М: *1* — объектив; *2* — призма; *3* — пленка; *4* — барабан

В варианте 2×8 *мм* выдержка

$$t = 0{,}84\ n^{-1}. \qquad (1\text{-}12)$$

Таким образом, при частоте съемки 4000 *кадр/с* на 16-*мм* кинопленке выдержка будет

$$t = \frac{0{,}8}{4000} = \frac{1}{5000}\ c,$$

а при частоте съемки 8000 *кадр/с* на кинопленке 2×8 *мм*

$$t = \frac{0{,}84}{8000} = \frac{1}{9524}\ c.$$

Привод аппарата осуществляется двумя электродвигателями, которые могут работать как на постоянном, так и на переменном

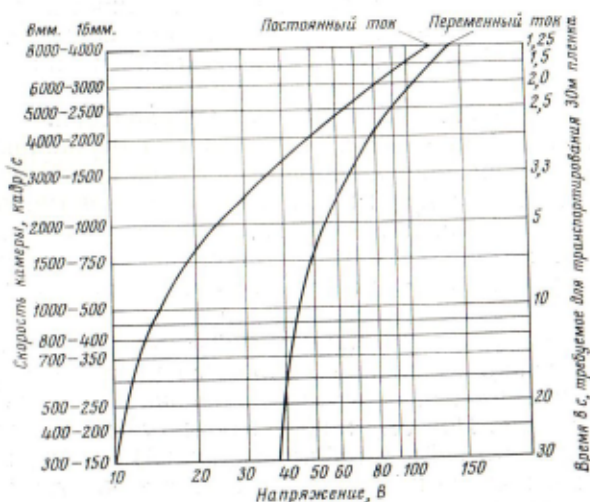


Рис. 1-5. Характеристики работы киноаппарата СКС-1М на постоянном и переменном токе

токе. Один электродвигатель вращает лентопротяжный барабан и компенсирующую призму, а другой — ось фрикционного наматывателя. Характеристики работы киноаппарата на постоянном и переменном токе приведены на рис. 1-5.

Высокоскоростной киноаппарат «Пентацет-16» (рис. 1-6) дает возможность получать на 16-*мм* кинопленке стабилизированные частоты съемки 300, 600, 1000, 2000 и 3000 *кадр/с*. Заданные скорости съемки достигаются очень быстро благодаря большой мощности электродвигателя трехфазного тока, который вращается синхронно с частотой тока в сети. Изменение скорости съемки производится подбором пар шестерен, размещенных за дверцей на задней стенке аппарата.

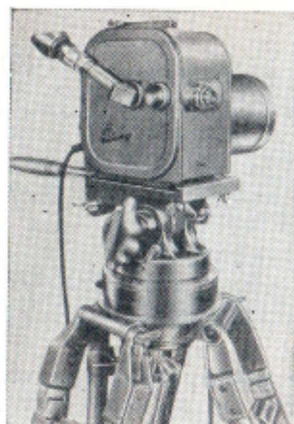


Рис. 1-6. Высокоскоростной киноаппарат «Пентацет-16»

Схема конструкции киноаппарата «Пентацет-16» приведена на рис. 1-7. Оптический компенсатор — вращающаяся двенадцатигранная призма. Объективы сменные: $f=35$ *мм*, 1:2 и $f=125$ *мм*, 1:2,8, специально рассчитанные для этого компенсатора.

Выдержка при экспонировании каждого кадра равна обратной величине частоты съемки, то есть

$$t = n^{-1}. \tag{1-13}$$

Установка кадра и фокусирование изображения производится через визирную лупу с десятикратным увеличением непосредственно по пленке или помещенной в фильмовый канал матированной пленке.

Включают киноаппарат через пульт управления.

Совершенствование высокоскоростных киноаппаратов с непрерывным движением кинопленки и оптической компенсацией с помощью вращающейся призмы направлено, во-первых, на улучшение резкости изображения и, во-вторых, на автоматизацию процесса съемки, как-то: стабилизацию заданной частоты съемки и синхронизацию работы аппарата с моментом начала снимаемого процесса.

При сильном и возрастающем натяжении кинопленки при ее транспортировании с большой скоростью и особенно при разгоне возникают вибрации, отрицательно влияющие на точность оптической компенсации. Поэтому в конструкцию лентопротяжного механизма вводят второй (стабилизирующий) зубчатый барабан (рис. 1-8), назначение которого состоит в том, чтобы без значительного натяжения правильно расположить кинопленку в момент

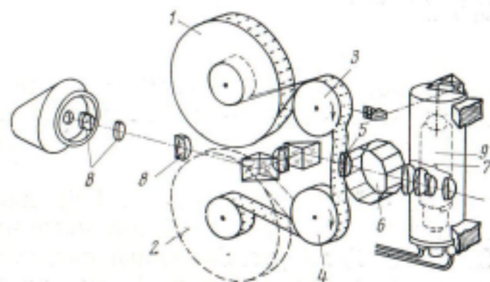


Рис. 1-7. Схема конструкции киноаппарата «Пентацет-16»:
1 и *2* — подающая и принимающая бобины; *3* и *4* — ведущие зубчатые барабаны; *5* — кадровое окно; *6* — компенсирующая вращающаяся призма; *7* — объектив; *8* — лупа сквозной наводки; *9* — газосветная лампа отметчика времени

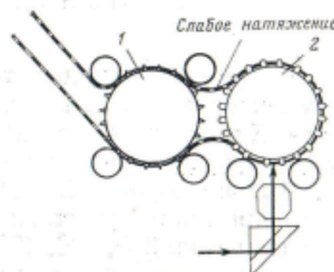


Рис. 1-8. Транспортирование кинопленки с помощью двух зубчатых барабанов:
1 — основной зубчатый барабан; *2* — дополнительный (стабилизирующий) зубчатый барабан, на котором экспонируется кинопленка

ее экспонирования. Зубья стабилизирующего барабана полностью заполняют перфорации кинопленки, аналогично зубьям контргрейфера. Первый же зубчатый барабан, выполняющий функции подачи кинопленки с подающей бобины и сдерживания усилия фрикционного наматывателя принимающей бобины, имеет зубья, которые

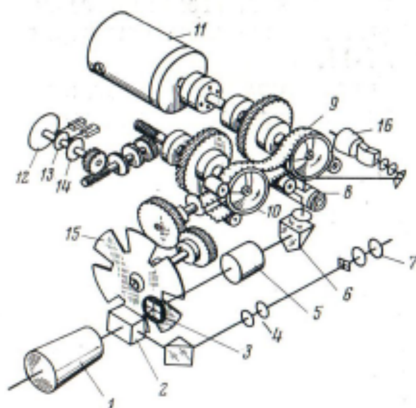


Рис. 1-9. Схема конструкции киноаппарата «Химаг-16НД»:
1 — объектив; *2* — светоделительная призма, отводящая часть света в визирную лупу; *3* — кадровая рамка для первичного изображения и коллектив; *4* — объектив визирной лупы; *5* — объектив, передающий изображение на кинопленку; *6* — оборачивающая призма; *7* — окуляр визирной лупы; *8* — вращающаяся компенсирующая призма; *9* — дополнительный зубчатый барабан, на котором кинопленка экспонируется; *10* — лентопротяжный зубчатый барабан; *11* — электродвигатель; *12* — счетчик метров кинопленки; *13* — контактное устройство, включающее в действие снимаемый объект; *14* — автоматический выключатель электродвигателя; *15* — обтюратор; *16* — оптическая система для получения изображения экрана осциллографа на кинопленке (одновременно со снимаемым процессом или явлением)

не заполняют полностью перфораций, так как рассчитаны на протягивание кинопленки с большим усилием, когда кинопленка растягивается в пределах упругих деформаций. Так устроен высокоскоростной киноаппарат «Химаг-16НД» «Япония», схема которого дана на рис. 1-9.

Механизм киноаппарата «Хикам» (США) не имеет шестереночных передач, так как все его движущиеся элементы расположены на одном валу (рис. 1-10), что также снижает вибрации. Сцепление

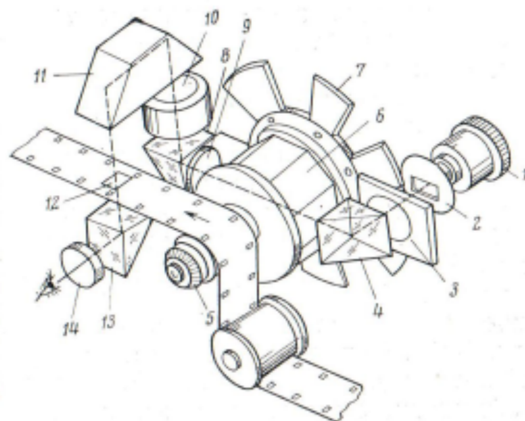


Рис. 1-10. Механизм киноаппарата «Хикам»:
1 — основной объектив; *2* — апертурная маска; *3* — первая полевая линза; *4* — первая отклоняющая призма; *5* — лентопротяжный зубчатый барабан; *6* — вращающаяся компенсирующая призма; *7* — обтюратор; *8* — вторая отклоняющая призма; *9* — вторая полевая линза; *10* — второй объектив, передающий изображение объекта съемки на кинопленку; *11* — оборачивающая призма; *12* — кадровая рамка; *13* — призма, отклоняющая изображение кадра в визирную лупу; *14* — визирная лупа или объектив для получения на кинопленке (с обратной стороны) изображения экрана осциллографа

вала электродвигателя с единственным валом механизма осуществляется гидравлической муфтой, обеспечивающей плавный набор скорости.

Оптическая компенсация с помощью вращающегося зеркального многогранника. Принципиальная схема оптической компенсации с помощью вращающегося зеркального многогранника показана на рис. 1-11.

Киносъемочный объектив направлен не непосредственно на снимаемый объект, а «видит» его отражение в плоских зеркалах многогранника. Так как зеркальный многогранник вращается, то последовательно проходящие перед объективом плоские зеркала непрерывно изменяют угол наклона относительно оптической оси объектива, что вызывает смещение изображения на кинопленке. В кадровом окне киноаппарата кадры бегут один за другим в том же направлении, в котором движется кинопленка.

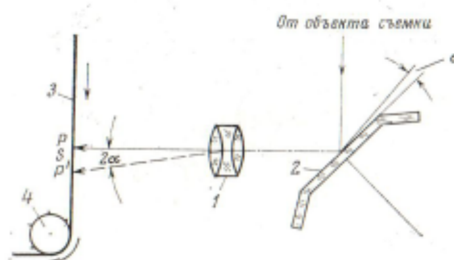


Рис. 1-11. Принципиальная схема оптической компенсации с помощью вращающегося зеркального многогранника:
1 — объктив; *2* — плоское зеркало многогранника; *3* — кинопленка; *4* — зубчатый барабан

Перемещение изображения определяется углом поворота каждого зеркала относительно оптической оси и величиной фокусного расстояния киносъемочного объектива. При повороте зеркала на угол α угол поворота отраженного луча составляет 2α. Таким образом, путь s $(p—p')$, проходимый изображением элементарной точки обекта, связан с углом поворота зеркала и фокусным расстоянием объектива следующей зависимостью:

$$s = 2\alpha f. \tag{1-14}$$

Объектив и каждое зеркало многогранника составляют единую точно рассчитанную оптическую систему, которую нельзя нарушать перемещением объектива или его заменой. Фокусирование изображения предметов, находящихся на конечных расстояниях, может производиться не выдвижением объектива, а только с помощью насадочных линз.

Изображение на кинопленке при такой схеме его построения получается зеркальным: правая сторона объекта будет находиться на левой стороне кадра, а левая — на правой.

Оптическая компенсация с помощью вращающегося зеркального многогранника применена в 35-*мм* высокоскоростном киноаппарате «Пентацет-35» (рис. 1-12). В нем зеркала расположены на внутренней поверхности обода прочного металлического барабана (рис. 1-13). Оптическая система состоит из двух объективов. Первый объектив, расположенный снаружи, образует промежуточное изображение снимаемого объекта. Второй объектив, находящийся

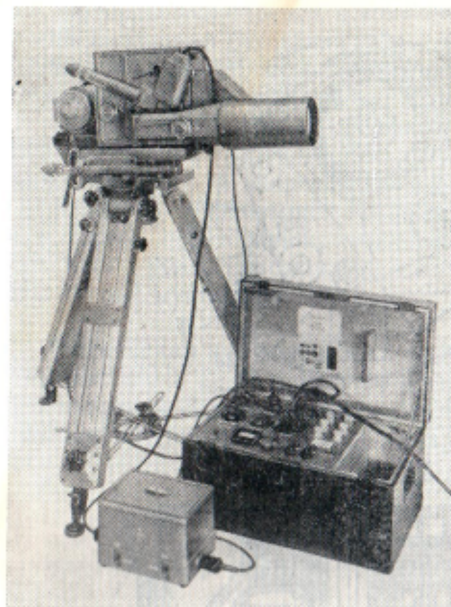


Рис. 1-12. Высокоскоростной киноаппарат «Пентацет-35»

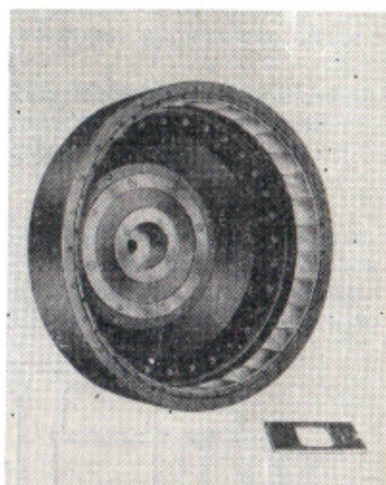


Рис. 1-13. Обод металлического барабана с зеркалами

внутри киноаппарата, передает промежуточное изображение, отраженное от зеркал многогранника на кинопленку. Благодаря промежуточному изображению окончательное изображение становится прямым, а не зеркальным.

Конструктивная схема киноаппарата «Пентацет-35» показана на рис. 1-14.

Барабан с 30 зеркалами дает на кинопленке кадры нормального формата. Имеются еще три сменных барабана: с числом зеркал 60, 90 и 120, которые позволяют получать кадры, уменьшенные по высоте в 2, 3 и 4 раза для того, чтобы соответственно увеличить частоту киносъемки.

Наружные объективы сменные: $f=45$ *мм*, 1:2 и $f=360$ *мм*, 1:2,8.

Точная установка кадра и фокусирование изображения производится по пленке (или матированной пленке) с помощью визирной лупы с пятикратным увеличением. Для грубой установки кадра и наблюдения за объектом во время съемки служит телескопический видоискатель.

Выдержку регулируют раздвижными шторками, расположенными в кадровом окне, которые действуют, как щелевой фотозатвор, с той лишь разницей, что в данном случае щель неподвижна, а движется кинопленка.

При полностью раздвинутых шторках выдержка

$$t = n^{-1}. \qquad (1\text{-}15)$$

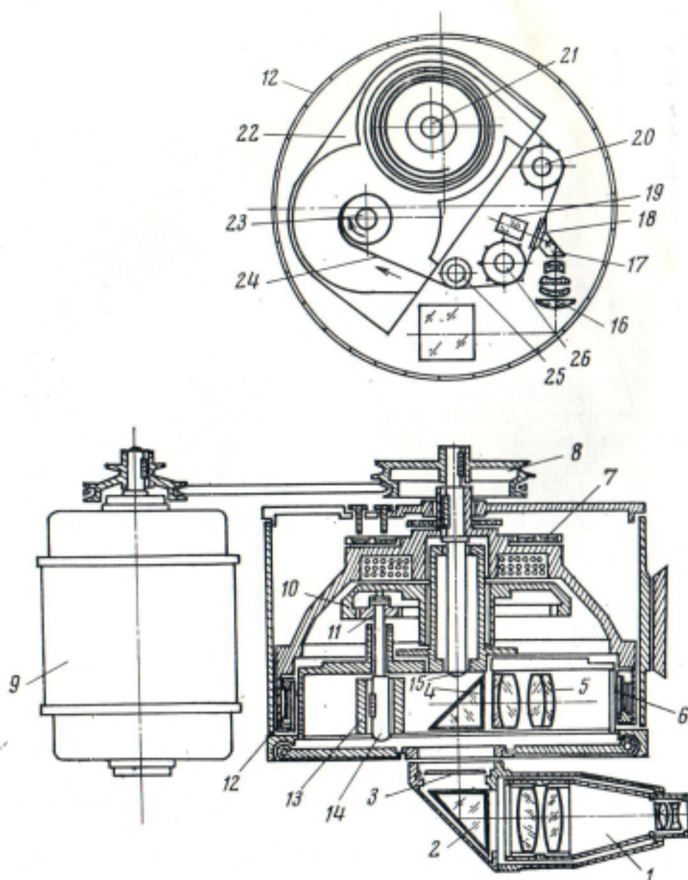


Рис. 1-14. Конструктивная схема киноаппарата «Пентацет-35»:
1 — съемочный объектив; 2 — призма; 3 — плоскость промежуточного изображения; 4 — призма; 5 — промежуточный объектив; 6 — зеркальный барабан; 7 — магнитная муфта; 8 — двухступенчатый шкив; 9 — электродвигатель; 10, 11 — зубчатые колеса; 12 — зеркало на барабане 6; 13 — зубчатый барабан; 14, 15 — валы; 16 — объектив; 17 — призма; 18 — фильмовый канал; 19 — призма; 20 — зубчатый барабан; 21 — ось сматывателя; 22 — кассета; 23 — ось наматывателя; 24 — пленка; 25 — направляющий ролик; 26 — зубчатый барабан

Кинопленка движется в фильмовом канале аппарата непрерывно, ведомая двумя зубчатыми барабанами, перематываясь с подающей бобины на принимающую двойной кассеты.

Тяжелый металлический барабан с зеркалами требует значительного усилия и времени на разгон. Если бы он был жестко связан с лентопротяжным механизмом, то потребовался бы большой непроизводительный расход кинопленки, пока будет достигнута нужная скорость вращения барабана. Поэтому барабан соединяется с лентопротяжным механизмом посредством электромагнитной муф-

ты, которая включается в момент, когда достигнута нужная скорость вращения барабана. Максимальная скорость движения кинопленки в аппарате может быть доведена до 40 *м/с*, что соответствует частоте съемки 2000 *кадр/с* при кадрах полного формата.

Электродвигатель киноаппарата трехфазный для напряжения 220/380 *В*. Три пары сменных шкивов позволяют произвести подбор для необходимой скорости съемки.

Включение киноаппарата производится через пульт управления, в котором имеется выпрямительное устройство для получения постоянного тока, необходимого для приведения в действие электромагнитной муфты.

Оптическая компенсация с помощью движущихся линз. Рассмотрим рис. 1-15. Если между объективом *1* и равномерно движущейся кинопленкой *3* расположить быстро вращающийся диск с определенным числом одинаковых линз *2*, то можно получить оптическую

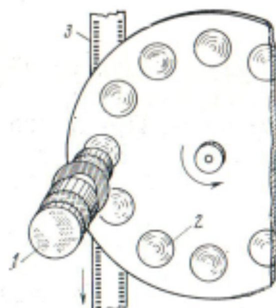


Рис. 1-15. Оптическая компенсация с помощью вращающегося диска с линзами

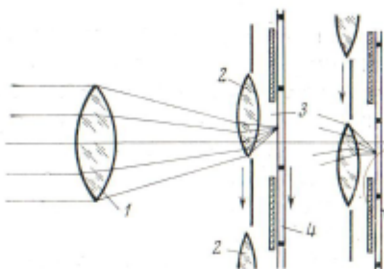


Рис. 1-16. Работа движущейся линзы в двух положениях:
1 — объектив; *2* — движущиеся линзы; *3* — экспозиционное окно; *4* — кинопленка

компенсацию. Действие движущейся линзы показано на рис. 1-16. Чтобы уравнять смещение оптического изображения с движением кинопленки, скорость движения линз должна быть в 10—20 раз больше скорости движения кинопленки и фокусное расстояние линз больше, чем расстояние от диска до кинопленки, в 10—20 раз.

Такой способ оптической компенсации применен в высокоскоростном киноаппарате «Цейтденер» фирмы «Аскания» (Западный Берлин). Он дает частоту съемки до 1000 *кадр/с* на 35-*мм* кинопленке.

Расчет времени экспозиции при киносъемке быстро движущихся объектов. В научной кинематографии кинокадры часто используются для получения количественной информации о движущихся объ-

ектах, подвергаются техническим измерениям для детального анализа быстрых движений.

Нерезкость фотографического изображения, вызванная движением объекта съемки, определяется величиной смещения оптического изображения объекта в кадре за время экспонирования.

Величина нерезкости изображения на кинопленке Δs зависит от скорости движения снимаемого объекта v, масштаба изображения m, косинуса угла между направлением движения объекта и оптической осью объектива $\cos\theta$ и времени экспозиции t, то есть

$$\Delta s = vmt \cos \theta. \qquad (1\text{-}16)$$

Для научно-исследовательских киносъемок в качестве критерия предельно допустимой нерезкости изображения принимается 0,1 размера самой мелкой детали движущегося объекта.

При заданной величине Δs необходимое время экспозиции определяется по формуле:

$$t = \frac{\Delta s}{vm \cos \theta}. \qquad (1\text{-}17)$$

Когда объект съемки движется перпендикулярно оптической оси объектива киноаппарата ($\cos \theta = 1$), скорость перемещения изображения объекта на кинопленке будет максимальной. При движении объекта под некоторым углом к оси объектива, например 45°, скорость перемещения изображения будет уменьшена на величину $\cos 45° = 0{,}7$. Если же объект движется прямо на аппарат, то перемещения изображения объекта в кадре не будет, он лишь увеличивается в размерах.

Пример. Объект съемки — маленькие круглые частички, диаметром 2 *мм*, движутся со скоростью 2 *м/с*. Их нужно снять в масштабе 1:1. Направление движения частичек перпендикулярно оптической оси объектива. Величина нерезкости изображения частичек не должна превышать 0,1 их размера изображения. Определить максимально допустимую выдержку:

$$t = \frac{\Delta s}{vm} = \frac{0{,}2}{2000} = \frac{1}{10\,000}\ c,$$

Выдержку $\frac{1}{10\,000}$ *с* можно получить даже аппаратом грейферного типа. Например, при частоте съемки 150 *кадр/с* и угле раскрытия обтюратора 5° выдержка будет равна $\frac{1}{10\,800}$ *с*.

Освещение объектов киносъемки. При скоростных и высокоскоростных киносъемках нужны большие освещенности снимаемых объектов, так как выдержки малы. Для уменьшения величины нерезкости изображения быстро движущихся объектов также требуются чрезвычайно короткие выдержки. К этому могут добавиться и другие факторы, вызывающие необходимость дополнительного уве-

личения освещенности объектов съемки, например, если макрокиносъемка производится на цветную кинопленку низкой светочувствительности.

В наиболее благоприятном случае, когда светосила объектива не снижается, вследствие его большого выдвижения для макросъемки и при наличии высокочувствительной кинопленки практически необходимая освещенность объекта, снимаемого высокоскоростным киноаппаратом с частотой 4000 *кадр/с* при диафрагме 1 : 5,6, должна быть приблизительно равна 100 000 *лк*.

Получение таких высоких освещенностей может быть осуществлено лишь при использовании осветительных приборов прожекторного типа. Основным требованием к источнику света — прожектору — является высокая яркость при относительно малых размерах светящегося тела. Кроме того, искусственные источники света, применяемые при высокоскоростных киносъемках, должны излучать не изменяющийся во времени световой поток, то есть питание их должно производиться постоянным током, имеющим минимальные пульсации напряжения.

Источники искусственного света, работающие на переменном токе, излучают пульсирующий световой поток, вследствие чего экспозиция отдельных кадров оказывается неодинаковой. Пульсации светового потока наиболее выражены у флуоресцентных и дуговых источников света. У ламп накаливания пульсация светового потока также имеется, но вследствие тепловой инерции раскаленной светящейся нити она менее значительна. Тем не менее при высокоскоростных киносъемках пульсация заметна и при освещении объекта лампами накаливания.

Простейший способ устранения пульсаций света от ламп накаливания — это применение групп ламп (по три лампы в каждой группе), включаемых по одной в каждую из трех фаз электрической сети переменного тока.

Основные характеристики источников света, применяемых при высокоскоростных киносъемках, приведены в табл. 1-2.

Таблица 1-2

Основные характеристики источников света, применяемых при высокоскоростных киносъемках

Источник света	Яркость, *кд/м²*	Цветовая температура, К	Световая отдача *лм/Вт*
Проекционные и прожекторные лампы накаливания 300—2000 *Вт*	2—3	2900—3300	28—32
Угольная дуга высокой интенсивности 5—10 *кВт*	50—60	5500—6500	45—65
Ксеноновая лампа сверхвысокого давления 700—3000 *Вт*	25	6000	24—30

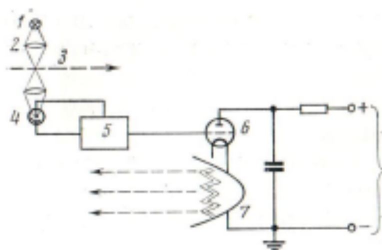


Рис. 1-17. Электронное устройство синхронизации вспышек импульсной лампы с высокоскоростным киноаппаратом

Ввиду того, что продолжительность высокоскоростной киносъемки невелика (0,1÷10 *с*), можно применять форсирование источников света путем повышения электрического напряжения, подводимого в клеммам лампы.

Лампы накаливания проекционного и прожекторного типа, а также зеркальные лампы типа ЗН-6 допускают форсирование до 150% от номинального напряжения. При этом яркость повышается в 6—7 раз, но снижается срок службы до 0,1—1% от номинального. Цветовая температура излучения повышается до 3300—3500 К. Особенно эффективными оказываются лампы накаливания с йодным циклом.

Угольная дуга высокой интенсивности практически не поддается форсированию ввиду резкого снижения стабильности ее горения.

Ксеноновая лампа сверхвысокого давления позволяет изменять силу тока в больших пределах. С увеличением силы тока происходит повышение яркости, но цветовая температура не изменяется.

В ряде случаев, когда требуются очень короткие выдержки для уменьшения нерезкости изображения быстро движущихся объектов или когда объекты съемки не терпят нагрева (например, биологические объекты), применяется освещение импульсными лампами. Для этого в некоторых высокоскоростных киноаппаратах имеется устройство, позволяющее синхронизировать вспышки импульсных ламп с определенным положением обтюратора или оптического компенсатора. Так как механическая коммутация при высокой частоте повторения вспышек невозможна, то применяются электронные устройства (рис. 1-17). Для управления вспышками импульсной лампы используются импульсы, получаемые пропусканием пучка инфракрасных лучей через перфорации кинопленки. Свет лампы накаливания *1*, отфильтрованный инфракрасным светофильтром *2*, фокусируется на перфорации кинопленки *3*. При движении кинопленки проходящие через перфорации порции инфракрасного света падают на фотоэлемент *4*, чувствительный к инфракрасным лучам, и вызывают в нем импульсы электрического напряжения, поступающие в усилитель *5* и далее на управляющую сетку тиратрона *6*, который зажигает импульсную лампу *7*.

Требования к кинопленке. В большинстве случаев для скоростной и высокоскоростной киносъемок необходима высокочувствительная кинопленка. Однако встречаются и весьма яркие самосветящиеся объекты, как, например, раскаленные капли металла в процессе сварки или различные вспышки и взрывы, для съемки ко-

торых можно использовать кинопленку низкой светочувствительности.

Определение фотографической экспозиции должно производиться с учетом уменьшения светочувствительности кинопленки при коротких выдержках. Это явление, называемое в сенситометрии отклонением от закона взаимозаместимости, весьма существенно при высокоскоростных киносъемках. Светочувствительность некоторых кинопленок при выдержках порядка 10^{-3}—10^{-4} может оказаться в 1,5 раза меньше, чем при обычной киносъемке с частотой 24 *кадр/с*, когда выдержка равна 0,02 *с*.

На рис. 1-18 показаны сенситограммы, экспонированные с соблюдением условия $H=Et$, но при разной длительности выдержки. В каждом случае изменение выдержки точно компенсировалось увеличением или уменьшением освещенности. Однако, как видим, фотографический результат получается разным, хотя все сенситограммы были проявлены одновременно. Наибольший эффект действия света достигается при выдержках 0,1—0,01 *с*. С уменьшением или увеличением выдержки закон взаимозаместимости не соблюдается, светочувствительность кинопленки оказывается ниже.

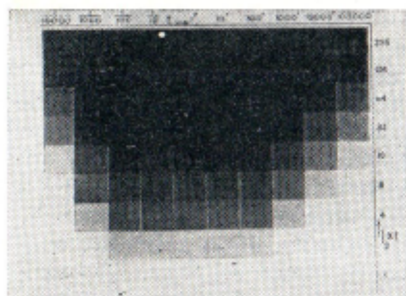


Рис. 1-18. Сенситограммы, полученные при разной длительности выдержки

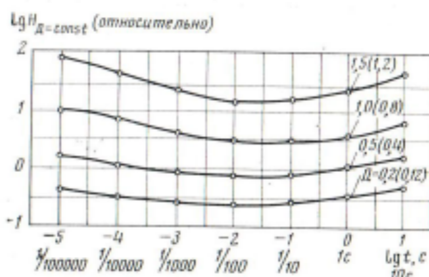


Рис. 1-19. Изоопаки для кинопленки КН-3

Характеристики невзаимозаместимости, называемые изоопаками, строятся на координатной логарифмической сетке. По оси ординат откладываются количества освещения lg H, а по оси абсцисс — длительности выдержек lg$t$. Изоопаки показывают зависимость оптической плотности проявленной сенситограммы от длительности выдержки при одинаковых количествах освещения. На рис. 1-19 приведены изоопаки для кинопленки КН-3.

С уменьшением светочувствительности кинопленки при коротких выдержках одновременно происходит изменение формы характеристической кривой кинопленки, повышается контраст и удлиняется начальный криволинейный участок. Это может отразиться на цветовом балансе цветной многослойной кинопленки.

Выбор кинопленки для скоростной и высокоскоростной киносъемок не ограничивается фотографическими характеристиками.

Важное значение имеют точные геометрические размеры кинопленки. Неточно отперфорированная или изменившая свои размеры после длительного хранения кинопленка непригодна для киносъемки скоростными и высокоскоростными киноаппаратами. Усадка кинопленки не должна превышать 0,2%. Точность шага перфораций кинопленки проверяют с помощью специальной измерительной линейки или гребенки.

Синхронизация начала киносъемки с началом снимаемого процесса. Кинопленка в высокоскоростном киноаппарате расходуется чрезвычайно быстро. При частоте съемки 2000 *кадр/с* скорость движения 35-*мм* кинопленки равна 38 *м/с*. Если кассета вмещает 50 *м* кинопленки, то этого запаса хватает менее чем на 1 *с* съемки, так как часть запаса кинопленки уходит на разгон до достижения нужной скорости.

Для получения частоты съемки 4000 *кадр/с* 16-*мм* высокоскоростным киноаппаратом на разгон расходуется почти половина запаса 30-*м* кассеты, а время съемки с заданной частотой ограничивается приблизительно $^1/_2$ *с*.

Согласование работы киноаппарата с действием снимаемого процесса становится в этих условиях весьма сложной задачей, особенно если действие объекта съемки однократно, как, например, срабатывание какого-либо механизма, удар, взрыв, быстрое горение и т. п. В таких случаях необходима автоматическая синхронизация начала съемки с началом снимаемого процесса.

Способ синхронизации в каждом случае определяется особенностью снимаемого процесса или работы машины. Синхронизация заключается в том, что в нужный момент либо киноаппарат включается по сигналу, подаваемому объектом съемки, либо действие снимаемого объекта инициируется сигналом от киноаппарата. Для синхронизации используются электрические, магнитные, оптические или акустические датчики сигналов. Синхронизирующее устройство имеется в конструкции некоторых высокоскоростных киноаппаратов. Такое устройство выдает электрический импульс, который поступает на реле, приводящее в действие снимаемый объект, когда механизм киноаппарата достигает определенной скорости, и становится возможной съемка с заданной частотой.

Бывают случаи, когда включение киноаппарата должно производиться снимаемым объектом. Так, например, для съемки столкновения автомобиля с препятствием при испытаниях на прочность или безопасность пассажиров на автодроме устанавливаются датчики, подающие электрические сигналы на пусковое устройство киноаппарата.

Для киносъемки летящей пули в качестве датчика используется микрофон, который улавливает звук выстрела и подает управляющий сигнал в пусковое устройство импульсного или искрового осветителя. Акустический датчик удобен тем, что позволяет весьма просто и точно синхронизировать момент съемки с пролетом пули путем изменения расстояния между источником звука и микрофоном.

Чтобы своевременно включить высокоскоростной киноаппарат для съемки разрушения сварного баллона при взрыве под большим давлением, были использованы микрофоны для слабоухих. Несколько таких микрофонов были включены параллельно и прикреплены к внешней стороне баллона на расстоянии 10 *см* один от другого. Выводы микрофонов были соединены с усилителем и тиратроном, который подавал импульс напряжения на пусковое устройство киноаппарата. Давление в баллоне постепенно повышалось в течение 4 *ч* и момент взрыва заранее предугадать было невозможно. Взрыв баллона начинается с потрескивания, и этот звук воспринимался микрофонами, управлявшими системой включения киноаппарата. Синхронизация была обеспечена. Съемка удалась.

Для автоматизации процесса высокоскоростной киносъемки разработаны универсальные устройства, с помощью которых осуществляется:

1) дистанционное включение и выключение киноаппарата;

2) подача в определенный момент импульса на реле, которое приводит в действие снимаемый объект или возбуждает начало явления;

3) синхронизация вспышек импульсного осветителя (если такой применяется) с моментами, когда каждый кадр должен экспонироваться.

Подача электрического импульса на реле, приводящее в действие снимаемый объект, может производиться в соответствии с одной из следующих характеристик работы киноаппарата:

1) по прохождении заданного числа кадров;

2) по достижении кинопленкой заданной скорости;

3) по прохождении заданного интервала времени.

Эксплуатация высокоскоростных киноаппаратов. Механизмы скоростных и высокоскоростных киноаппаратов работают на пределе технических возможностей при очень больших числах оборотов и ускорениях, и эти механизмы рассчитаны на кратковременное действие при максимальных скоростях. Требование ограничения длительности работы скоростного или высокоскоростного киноаппарата должно поэтому соблюдаться неукоснительно, так как от этого зависит исправность его работы. Скоростной или высокоскоростной киноаппарат не должен находиться в действии ни одной лишней секунды дольше времени, необходимого для съемки.

Важнейшее значение имеет своевременная смазка механизма. Некоторые киноаппараты требуют смазки перед каждой съемкой.

Проверка величины усушки кинопленки с помощью гребенки или измерительной линейки обязательна. Использование усохшей кинопленки может привести к ее обрыву на большой скорости и повреждению механизма киноаппарата. Каждый случай заедания кинопленки, вызванный наматыванием ее после обрыва несколькими слоями на зубчатые барабаны, и образование «салата» ведет к повреждению деталей лентопротяжного механизма и оптического

компенсатора, нарушению их балансировки, то есть к порче киноаппарата.

Необходимо тщательным образом удалять пыль, образуемую трущейся кинопленкой, отсасыванием с помощью пылесоса или напорной струей воздуха. При быстром вращении бобин, зубчатых барабанов, направляющих роликов и оптического компенсатора поднимается пыль, которая пробивается в отделение, где находится оптический компенсатор, и оседает на нем, а это приводит к снижению резкости и контраста изображения. Оптические детали компенсатора требуют осторожного обращения.

Глава 2

СВЕРХСКОРОСТНАЯ КИНОСЪЕМКА

Для изучения чрезвычайно быстрых и кратковременных физических процессов, таких, как взрыв, удар, молния, электрический разряд, распространение ударных волн, образование высокотемпературной плазмы, появление и превращение веществ, продолжительность которых исчисляется миллионными долями секунды, требуется замедление времени в несколько тысяч или до десятков миллионов раз.

Для получения сверхвысоких частот киносъемки используют оптико-механические, электрические, электронно-оптические системы, дающие возможность фиксировать последовательный ряд снимков с очень высокой частотой повторения. Эти снимки можно перепечатать на специальном оптическом копировальном аппарате на кинопленку со стандартными размерами и соответствующим расположением кадров относительно перфораций. Полученный таким путем кинофильм можно рассматривать на киноэкране и увидеть быстро протекающий процесс в замедленном темпе.

Достигнутая скорость съемки позволяет зафиксировать на нескольких снимках распространение импульса света — «световой пули», которая за время экспозиции одного кадра успевает продвинуться всего лишь на несколько миллиметров.

Напомним, что свет распространяется со скоростью 300 000 *км/с*. За одну наносекунду (10^{-9} *с*) свет проходит путь, равный 300 *мм*. Отношение одной наносекунды к одной секунде такое же, как одной секунды к тридцати годам.

Сверхскоростная киносъемка на движущуюся кинопленку ограничивается частотой 100 000 *кадр/с*. Дальнейшее увеличение частоты съемки осуществляется различными способами на неподвижную фотопленку или фотопластинку. В табл. 2-1 приведена классификация способов сверхскоростной киносъемки.

Чтобы зафиксировать на кино- или фотопленке исследуемый кратковременный процесс, необходимо обеспечить с высокой точностью согласование включения киноаппарата с началом развития исследуемой фазы процесса.

Некоторые процессы могут быть инициированы с достаточной точностью от импульса, вырабатываемого киноаппаратом, по его готовности к съемке с заданной скоростью.

Таблица 2-1

Классификация способов сверхскоростной киносъемки

Способы сверхскоростной киносъемки	Предельная частота киносъемки, *кадр/с*
Съемка на непрерывно движущуюся кинопленку	
Способ деления кинокадра, применяемый в высокоскоростных киноаппаратах с оптической компенсацией	40 000
Способ ультракоротких выдержек при непрерывном движении кинопленки	100 000
Съемка на неподвижную фотопленку или фотопластинку	
Способ искрового освещения	1 000 000
Способ оптической коммутации кадров	10 000 000
Способ электронно-оптической коммутации кадров	100 000 000
Растровый способ	1 000 000 000

Для съемки физических процессов, длительность протекания которых составляет тысячные или миллионные доли секунды и их трудно или невозможно инициировать в нужные моменты с достаточной точностью, применяется «ждущий» режим работы съемочного аппарата. После разгона аппарат находится в готовности к съемке некоторое время. Начало и окончание съемки ограничивается предохранительным фотозатвором на объективе или заданным числом вспышек импульсного источника света. Фотозатвор или импульсный источник света должен быть синхронизирован с началом развития исследуемого процесса, однако это осуществить значительно легче, чем привести в действие весь аппарат.

Способ деления кадра. Наиболее простой способ увеличения частоты съемки — это уменьшение размеров кинокадра по высоте или по высоте и ширине (рис. 2-1). Если уменьшить высоту кадра в 2, 3, 4 и более раз, то можно соответственно увеличить частоту съемки при той же скорости движения кинопленки. Уменьшив кадр также и по ширине, частота съемки будет еще больше.

Результаты съемки, полученные способом деления кадра, непригодны для проекции на экран с помощью обычного кинопроектора. Чтобы сделать кинофильм, необходимо произвести выкопировку кадров на кинопленку со стандартными размерами и расположением кадра. Сверхскоростная киносъемка по способу деления кадра осуществляется киноаппаратами с непрерывным движением кинопленки и оптической компенсацией.

Чтобы уменьшить высоту кадра, необходимо заменить в аппарате кадровую рамку и оптический компенсатор. Киноаппарат «Пен-

тацет-35» имеет в комплекте кроме основного многогранника с 30 зеркалами еще три сменных — с 60, 90 и 120 зеркалами — для получения кадров, уменьшенных по высоте в 2, 3 и 4 раза.

В киноаппарате СКС-1М для получения кадров формата 2×8 *мм* четырехгранную призму заменяют на восьмигранную.

Для строчного расположения кадров, уменьшенных также и по ширине, перед съемочным объективом устанавливают множащую



Рис. 2-1. Способ уменьшения размеров кинокадра



Рис. 2-2. Множащая призма

призму. На рис. 2-2 показана призма, состоящая из пяти элементарных призм, с помощью которой на кинопленке образуется пять одинаковых изображений объекта съемки, расположенных в ряд по ширине кинопленки. В фильмовый канал устанавливают ступенчатую кадровую рамку.

Способ ультракоротких выдержек. Самая высокая скорость движения кинопленки достигается в так называемом барабанном киноаппарате, в котором кинопленка облегает наружную поверхность быстро вращающегося прочного стального барабана, помещенного в светонепроницаемый корпус (рис. 2-3).

При диаметре барабана 0,5 *м* длина кинопленки составляет 1,57 *м*, что дает возможность получить 80 кадров полного формата на 35-*мм* кинопленке или 200 кадров на 16-*мм* кинопленке.

Барабан может вращаться со скоростью 4000 *об/мин*. При этом периферийная скорость барабана с кинопленкой достигает 100 *м/с*. Частота съемки на 35-*мм* кинопленку будет равна 10 400 *кадр/с*, а на 16-*мм* кинопленку — около 25 000 *кадр/с*. Если размеры кадров уменьшить по высоте, то можно получить бóльшую частоту кинопленки.

Оптического компенсатора барабанный киноаппарат не имеет. Изображения кадров получаются резкими за счет ультракоротких выдержек.

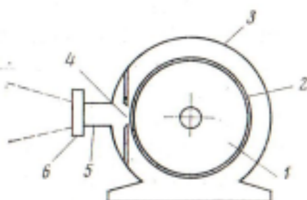


Рис. 2-3. Схема барабанного киноаппарата:
1 — вращающийся барабан; *2* — кинопленка; *3* — светозащитный корпус; *4* — кадровое окно; *5* — объектив; *6* — фотозатвор

Съемка несветящихся объектов производится в затемненном помещении при освещении их вспышками импульсных ламп или электрических искр. В настоящее время существуют мощные импульсные источники света, дающие серии вспышек с частотой до 100 000 вспышек в секунду. Мощность каждой вспышки до 4—8 *Дж* при длительности вспышки около 1 *мкс*. Имеются также импульсные источники света меньшей мощности, дающие до 50 000 вспышек в секун-

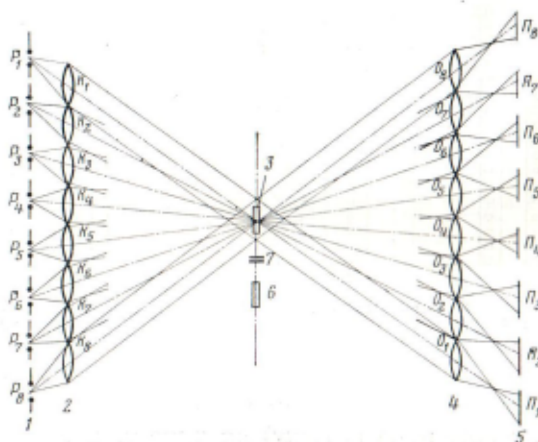


Рис. 2-4. Оптическая схема искровой установки:
1 — разрядники; *2* — конденсоры; *3* — объект съемки; *4* — объективы фотокамер; *5* — фотопленка; *6* — летящий объект съемки (пуля); *7* — конденсатор

ду с энергией на каждую вспышку 0,1 *Дж* и длительностью от 10 до 20 *нс*.

При съемке ярких самосветящихся объектов ультракороткие выдержки порядка 0,05 *мкс* получают с помощью электрооптического фотозатвора с ячейкой Керра или Поккельса, о которых рассказано на стр. 44 и 45.

Барабанный киноаппарат работает в ждущем режиме. Барабан с кинопленкой приводится во вращение раньше предполагаемого начала возникновения снимаемого процесса при закрытом положении предохранительного фотозатвора на объективе. По сигналу исходящего от снимаемого объекта в момент начала развития изучаемой фазы процесса предохранительный фотозатвор открывается. После одного оборота барабана фотозатвор срабатывает на закрытие, предотвращая повторное экспонирование кинопленки.

Расположение кадров на кинопленке относительно перфораций случайное. Поэтому, чтобы получить кинофильм, кинокадры эти необходимо перепечатать или переснять на кинопленку со стандартными размерами кадра и соответствующим расположением кадров относительно перфораций.

Искровой способ. Искровым способом можно получать серии кадров на неподвижной фотопластинке или фотопленке с частотой до 1 000 000 *кадр/с* с выдержками порядка 10^{-8} — 10^{-9} *с*.

Благодаря большим размерам снимков (в большинстве случаев каждый снимок представляет собой круг диаметром около 30 *мм*) качество изображения получается очень хорошее. Для изучения снятого процесса на киноэкране фотокадры переснимают на обычную кинопленку, используя при этом прием размножения кадров.

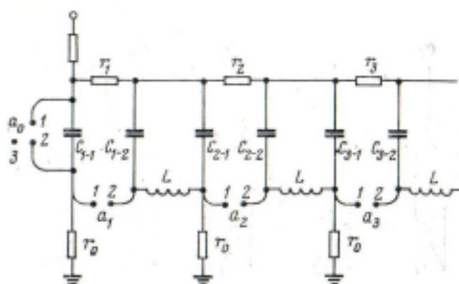


Рис. 2-5. Электрическая схема искровой установки

В конструкции съемочной искровой установки отсутствуют какие-либо движущиеся части. Синхронизация съемки со снимаемым явлением осуществляется простыми способами.

Искровая киносъемка применяется главным образом в баллистических исследованиях при изучении ударных явлений с возникновением волн сжатия и разрушением образца. При съемке используется чаще всего силуэтное освещение, а помещение, в котором производится киносъемка, затемняется.

Оптическая схема искровой установки показана на рис. 2-4. Искровые разрядники P_1, P_2, ..., P_8 и конденсоры K_1, K_2, ..., K_8, формирующие параллельные пучки световых лучей, располагаются таким образом, что световые пучки, выходящие из конденсоров при появлении искр в разрядниках, сходятся и оси их пересекаются в точке, вблизи которой помещается объект съемки. По другую сторону снимаемого объекта пучки параллельных лучей расходятся и направляются на объективы O_1, O_2, ..., O_8, фокусирующие изображения объекта в плоскостях Π_1, Π_2, ..., Π_8.

Когда в первом разряднике P_1 появится электрическая искра, пучок света из конденсора K_1 направляется на объектив O_1 и далее на пленку Π_1, образуя на ней резкое силуэтное изображение объекта на размытом изображении освещенного отверстия конденсора K_1. При последовательном срабатывании искровых разрядников изображения получаются также на пленках Π_2, Π_3, ..., Π_8.

Электрическая схема искровой установки (для первых трех разрядников) изображена на рис. 2-5; для остальных разрядников она имеет аналогичный вид. Здесь C_{1-1}, C_{1-2}, C_{2-1}, C_{2-2}, C_{3-1}, C_{3-2} — кон-

денсаторы разрядных контуров; r_1, r_2, r_3 — резисторы, создающие необходимое затухание в разрядных контурах; L — катушки индуктивности в контурах связи; r_0 — резисторы, через которые производится зарядка конденсаторов от общего источника питания; a_0 — трехэлектродный пусковой разрядник.

Перед съемкой все конденсаторы заряжаются до напряжения, немного меньше того, при котором пробивается разрядник a_0, а электроды разрядников a_1, a_2, a_3 оказываются при одинаковых потенциалах и искры в них не появляются. Для включения искровых

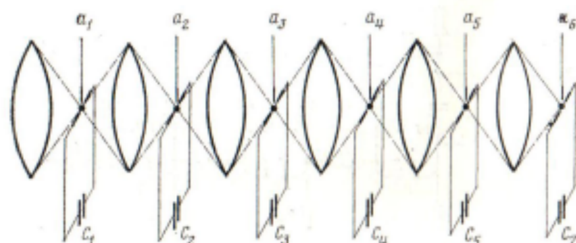


Рис. 2-6. Схема беспараллаксной осветительной установки

разрядников на электрод *3* разрядника a_0 подается импульс напряжения от синхронизирующего устройства, который пробивает промежуток *3—2*, а затем и промежуток *2—1*, вызывая разряд конденсатора C_{1-1}. Так как разряд носит колебательный характер, то напряжение на конденсаторе C_{1-1} быстро меняет знак и, складываясь с напряжением конденсатора C_{1-2}, пробивает первый разрядник a_1, образующий первую искру в осветительном устройстве.

Разряд в первом разрядном контуре затухает настолько быстро благодаря резистору r_1, что искра в разряднике a_1 появляется только один раз и ток разряда проходит только в одном направлении, после чего разряд обрывается, а на конденсаторе C_{1-2} остается некоторый потенциал противоположного знака. Вследствие этого в контуре C_{1-2}, L, C_{2-1}, связывающем первый и второй разрядные контуры, возникают колебания и через промежуток времени, равный половине периода колебаний этого контура, напряжение на конденсаторе C_{2-1} меняет знак. Это напряжение, складываясь с напряжением конденсатора C_{2-2}, пробивает разрядный промежуток a_2. Таким образом в осветительном устройстве появляется вторая искра. Все последующие искры образуются в разрядниках таким же образом.

Интервалы между отдельными искрами определяются электрическими характеристиками колебательных контуров, и они могут быть менее 1 *мкс*. Длительность искрового разряда, определяющего фотографическую выдержку, обычно бывает 10^{-7} *с*. Напряжение конденсаторов 10—12 *кВ*, а энергия каждого искрового разряда около 2,5 *Дж*.

Синхронизация момента начала съемки со снимаемым процессом осуществляется подачей импульса напряжения на поджигающий электрод *3* от отдельной схемы, в котором датчиком служит контакт, замыкаемый летящей пулей. Датчик представляет собой два изолированных друг от друга листа фольги, пробиваемых пулей и осуществляющих контакт.

Для полного устранения параллаксов используется осветительная установка, показанная на рис. 2-6. Здесь искровые разрядники расположены один за другим в одну линию, а между разрядниками поставлены объективы, фокусирующие изображение каждого следующего разрядного промежутка на предыдущий, изображая его в масштабе 1:1. Однако число разрядников при этой схеме ограничено из-за больших потерь света.

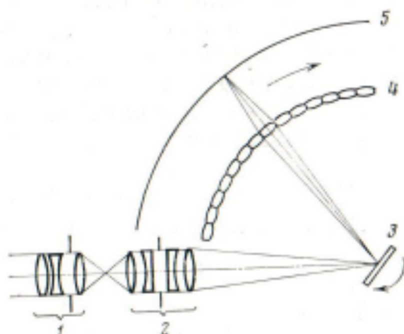


Рис. 2-7. Схема оптической коммутации кадров

Способ оптической коммутации кадров дает возможность фиксировать на неподвижной кинопленке изображения с частотой до 10 000 000 *кадр/с*.

Схема оптической коммутации кадров показана на рис. 2-7. Объективы *1* и *2* создают промежуточное изображение на плоском вращающемся зеркале *3*. Это изображение переносится объективами *4* на неподвижную кинопленку *5*. Отраженный вращающимся зеркалом *3* пучок световых лучей пробегает по расположенным по дуге объективам *4*, каждый из которых образует на кинопленке отдельное изображение кадра. Так как промежуточное изображение на зеркале *3* неподвижно и расположено в центре вращения пучка отраженных лучей, то изображения на кинопленке также неподвижны, несмотря на вращение зеркала. При повороте зеркала на определенный угол пучок световых лучей, отраженный зеркалом, будет направлен на соседний объектив, образующий на кинопленке изображение следующего кадра. Такое устройство действует подобно серии фотокамер с высокочастотными затворами, последовательно открывающимися с небольшим сдвигом во времени. Пучок лучей, отраженный вращающимся зеркалом, пробегая по объективам, расположенным по дуге, как бы коммутирует образование последовательного ряда кадров.

Вращающееся зеркало имеет прямоугольную форму и служит одновременно рамкой, ограничивающей поле зрения серии объективов, поэтому отдельные кадры на кинопленке также имеют прямоугольную форму с резко очерченными границами. Чтобы в каждый момент времени работал только один объектив в ряду, необходимо соответствующим образом рассчитать аппаратуру этих объективов.

2—654

Разрешающая способность киноаппаратов, работающих по способу оптической коммутации кадров, достаточно высокая и составляет 32—50 *лин/мм*.

Предельная частота съемки в аппаратах с оптической коммутацией кадров ограничивается скоростью вращения зеркала.

Длина кинопленки в таких аппаратах ограниченна. Число кадров полного формата на 35-*мм* кинопленке обычно не превышает 25. Лишь в некоторых аппаратах число кадров достигает 400. Поэтому широко используется строчное расположение кадров уменьшенных размеров на 35-*мм* кинопленке.

Расположение кадров полного формата относительно перфораций кинопленки получается случайное. Для просмотра снятого материала на киноэкране необходима выкопировка кадров на стандартную кинопленку.

Способ электронно-оптической коммутации кадров. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) представляет собой вакуумный электронный прибор, в котором световое изображение преобразуется в изображение электронное и затем снова в световое. ЭОП имеет фотокатод, с которого под действием света вырываются электроны; анод, служащий для сообщения освободившимся электронам большой скорости; электронно-оптическую систему, с помощью которой осуществляется фокусировка электронов, и флуоресцирующий экран, преобразующий электронное изображение в световое.

Обычный ЭОП служит для преобразования радиации одной спектральной зоны в другую, например лучей невидимых инфракрасной и ультрафиолетовой зон в лучи видимой световой зоны, а также для усиления яркости изображения.

Специальный ЭОП, применяемый для сверхскоростной киносъемки, дает возможность осуществить ультракороткие экспозиции (до 10^{-8} *с*) и получить на неподвижном флуоресцирующем экране последовательный ряд кадров с частотой несколько десятков миллионов в секунду. Это осуществляется путем введения в конструкцию ЭОПа дополнительной электростатической системы, производящей скачкообразное перемещение изображения кадра по экрану и управляющей экспозициями.

Принципиальная схема сверхскоростного киноаппарата с электронно-оптической коммутацией кадров изображена на рис. 2-8. Объектив *1* создает световое изображение снимаемого объекта на фотокатоде *2*, который преобразует это световое изображение в изображение электронное. С помощью анода *4* и электростатической фокусирующей системы *5* электронное изображение переносится на фотоанод и флуоресцирующий экран *7*, вызывая его свечение и образование видимого изображения. На флуоресцирующем экране изображение получается перевернутым по отношению к изображению на фотокатоде, так как электростатическая система собирает электронные лучи в узкий пучок, проходящий отверстие 1—1,5 *мм*, что необходимо для управления электронным пучком с помощью отклоняющих пластин *6*.

Последовательные кадры образуются на флуоресцирующем экране путем быстрого переброса электронных пучков в различные участки экрана. Это осуществляется электростатическими полями, образуемыми парами отклоняющих пластин *6*, на которые подаются импульсы высокого напряжения 15—20 *кВ* симметричной полярности. Подачей же импульсного напряжения на сетку *3* закрывается доступ электронов на флуоресцирующий экран. Таким образом эта сетка выполняет роль электронного высокочастотного затвора, осуществляющего ультракороткие выдержки.

Изображение на флуоресцирующем экране, содержащее серию последовательных кадров, снимается фотокамерой *8* на фотопластинку или фотопленку *9*. Расположение кадров на флуоресцирующем экране и их число может быть различное. При малых размерах изображений общее число кадров более 100.

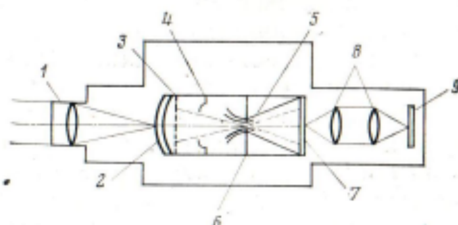


Рис. 2-8. Принципиальная схема киноаппарата с электронно-оптической коммутацией кадров изображения

Разрешающая способность киноаппарата с ЭОП (по флуоресцирующему экрану) может достигать 60—70 *лин/мм.*

Для получения кинофильма последовательные изображения кадров переснимают с фотопластинки обычным киноаппаратом на стандартную кинопленку.

Синхронизация работы аппарата с ЭОП с моментом начала снимаемого процесса осуществляется электрическими сигналами, получаемыми от снимаемого объекта. Обычно съемка начинается через промежуток времени менее 1 *мкс* после получения электрического сигнала.

Сверхскоростная многокадровая съемка аппаратами с электронно-оптической коммутацией кадров применяется при исследованиях в области физики плазмы, взрывных процессов, процессов химической кинетики и других быстрых и кратковременных физических явлений, протекающих за время порядка 10^{-6} — 10^{-8} *с*.

Несмотря на то, что киноаппараты с ЭОП обладают большой светосилой и значительным усилением света, имеется ряд слабосветящихся явлений, которые невозможно заснять даже этими аппаратами. Для преодоления этой трудности применяют дополнительный усилитель яркости изображения, который помещают либо перед объективом киноаппарата, либо позади светящегося экрана ЭОП, соединяя его со светочувствительным слоем фотопластинки стекловолоконной планшайбой, что дает возможность значительно снизить потери света. При съемке флуоресцирующего экрана обычным фотографическим способом в объектив попадает лишь около 2% излученного экраном света, в то время как большая часть света рассеивается и не участвует в образовании изображения в фотокамере. С помощью стекловолоконной прослойки излучение светящегося экрана передается фотопластинке почти полностью.

Растровый способ. Для исследования с помощью киносъемки взрывных процессов, сопровождающихся распространением ударных волн, скорость которых превышает 8 *мм/мкс*, необходима частота съемки до нескольких сотен миллионов кадров в секунду. Такие частоты съемки достигаются способом растровой съемки. Растром называется решетка, имеющая прозрачные щели и непрозрачные промежутки, или сетка в виде большого числа маленьких отверстий в непрозрачной пластине. Растры могут быть также линзовые, состоящие из цилиндрических или сферических линзочек.

В сверхскоростных киносъемочных аппаратах растр используется для рассечения изображения, которое строит съемочный объектив, на множество полосок или кружочков, между которыми имеются непрозрачные промежутки, причем размеры каждого элемента растра в десятки и даже сотни раз меньше расстояния между соседними элементами.

Растровый способ сверхскоростной киносъемки заключается в фиксации последовательных фаз снимаемого явления на фотопластинку или фотопленку путем смещения растрового изображения в период съемки. В результате растровой съемки получается фотограмма на фотопластинке, которая, однако, позволяет воспроизвести картину снятого процесса, если переснять фотограмму на кинопленку через тот же растр, последовательно передвигаемый от кадра к кадру.

Чтобы лучше понять, каким образом с помощью растрового способа съемки получают последовательные кадры, рассмотрим случай, когда используется щелевой растр, представляющий собой стеклянную пластинку, покрытую непрозрачным слоем, в котором на делительной машине прорезаны узкие прозрачные полоски (щели).

Допустим, что ширина щелей в 30 раз меньше, чем ширина непрозрачных промежутков. Если эту решетку установить перед фотопластинкой, то снимок предмета, например шара, сделанный сквозь щели решетки, будет состоять из параллельных линий (рис. 2-9, *а*). Передвинув решетку в направлении, перпендикулярном щелям, на величину, равную ширине щели, и сделав вторую экспозицию, будет получен второй кадр, состоящий также из серии линий, расположенных на фотопластинке рядом с линиями, составляющими первый кадр. Тридцать отдельных кадров будет зафиксировано в результате передвижения решетки и экспонирования всей площади фотопластинки.

Когда снимаемый предмет (в данном случае это шар) движется во время съемки, а решетка (растр) перемещается с постоянной скоростью перед фотопластинкой, то получится фотограмма, показанная на рис. 2-9, *б*. Разумеется, время съемки растрового изображения не должно превышать времени смещения растра на величину его шага (расстояния между щелями), иначе произойдет повторное экспонирование светочувствительного слоя фотопластинки. Длительность съемки должна быть ограничена согласованно действующим предохранительным фотозатвором или кратковременным

освещением снимаемого объекта с помощью импульсного или искрового источника света. Предохранительный фотозатвор не нужен, когда длительность кратковременного самосветящегося явления не превышает периода съемки.

Если рассматривать проявленную фотограмму через приложенный к ней и точно совмещенный растр, через который производилась съемка, то можно увидеть отдельные фазы снятого явления. Двигая растр относительно фотограммы в том же направлении, как при съемке, можно наблюдать движущуюся картину без мерцания.

Кинофильм получают путем пересъемки фотограммы через растр, последовательно от кадра к кадру перемещая его и фиксируя таким образом последовательные фазы изучаемого явления.

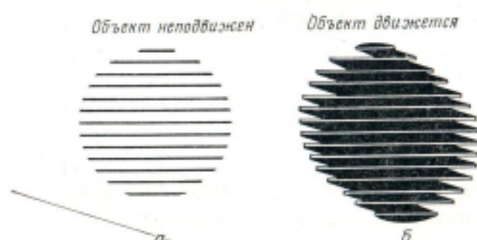


Рис. 2-9. Изображение, получаемое через линейчатый растр

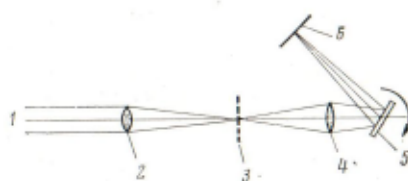


Рис. 2-10. Схема растрового киноаппарата

Чтобы произвести сверхскоростную киносъемку с частотой 100 000 000 *кадр/с* при ширине щелей в растровой решетке, равной 0,0127 *мм*, решетка с щелями должна перемещаться относительно фотопластинки со скоростью 250 *м/с*. Получить такую скорость удается с помощью оптической системы с вращающимся зеркалом. Схема киноаппарата показана на рис. 2-10.

Съемочный объектив *2* образует действительное изображение снимаемого объекта *1* в плоскости растровой решетки *3*. Это изображение, видимое сквозь щели решетки, переносится на неподвижную фотопластинку *6* с помощью второго объектива *4*, но не непосредственно, а после отражения от вращающегося зеркала *5*. Во время экспозиции растровая решетка и фотопластинка неподвижны, а изображение, видимое сквозь щели решетки, смещается с большой скоростью по фотопластинке, образуя фотограмму.

Разрешающая способность системы с щелевым растром, выражаемая числом линий на 1 *мм*, очевидно, будет равняться числу щелей на 1 *мм* изображения. Так, например, при масштабе изображения 1:1 и ширине щели 0,0127 *мм*, при общем числе кадров, равном 30, расстояние между щелями должно быть: $0{,}0127 \times 30 = 0{,}38$ *мм*. Следовательно, такая решетка будет иметь разрешающую способность в направлении, перпендикулярном щелям:

$$\frac{1}{0{,}0127 \cdot 0{,}38} = 2{,}5 \text{ лин/мм}.$$

Максимальное число кадров, которое можно получить за одну съемку, называют оптической емкостью растровой системы.

Для получения большей оптической емкости, а следовательно, увеличения времени съемки применяют способ разложения изображения на точечные элементы, расположенные, как показано на рис. 2-11. При перемещении растра относительно светочувствительного слоя в направлении, указанном стрелкой, каждый элемент растрового изображения экспонирует полоску длиной l, которая во много раз может превышать по величине шаг элементов растра h. Чем меньше элементы (точки или линии) растрового изображения, тем бо́льшую частоту съемки можно получить при одной и той же скорости смещения растра и тем больше будет разрешающая способность во времени.

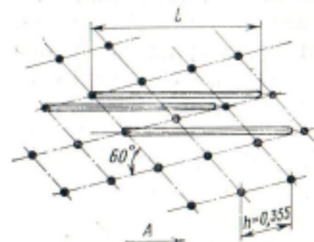


Рис. 2-11. Точечный растр с гексагональным расположением элементов

Линзовые растры выгодны потому, что обеспечивают более высокую светосилу растрового киноаппарата. Несмотря на малую апертуру съемочного объектива, эффективная светосила системы определяется относительными отверстиями линз растра. С применением точечных линзовых растров на фотопластинку размером 13×18 *см* можно нанести от 500 до 1000 кадров и получить качество изображения, равноценное качеству изображения на 16-*мм* кинопленке.

Выдержка в растровых аппаратах определяется скоростью смещения растрового изображения относительно светочувствительного материала и размером элементов растрового изображения.

Съемка растровыми аппаратами, как правило, производится на фотопластинку, которая меньше деформируется в процессе фотохимической обработки, сушки и хранении. Если используется фотопленка, то она должна быть на безусадочной основе.

В настоящее время имеется большое число конструкций растровых киноаппаратов, различающихся способами проецирования растрового изображения на фотопластинку и способами смещения растрового изображения.

Наиболее значительные успехи в создании растровых киноаппаратов достигнуты в Ленинградском институте киноинженеров (ЛИКИ). В этих аппаратах используются светосильные линзовые растры, разработанные в Научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ).

Освещение объектов при сверхскоростных киносъемках. Многие физические явления, которые исследуются с помощью сверхскоростной киносъемки, являются самосветящимися. Сюда относятся взрывы, вспышки высокотемпературной плазмы, молнии и электрические разряды, создаваемые в лабораторных условиях, процессы быстрого горения и т. д. Яркость свечения таких объектов в боль-

шинстве случаев вполне достаточна для экспонирования фотографического слоя с выдержками 10^{-5}—10^{-9} *с*.

Однако имеется большая группа объектов не светящихся, для съемки которых необходимо искусственное освещение чрезвычайно высокой интенсивности. Если, например, выдержка равна 10^{-8} *с*, то освещенность объекта съемки должна быть в 2 млн. раз больше,



Рис. 2-12. Простейшая схема заднего освещения с помощью точечного источника света и конденсора

чем при обычной киносъемке с частотой 24 *кадр/с*. Как получить такую освещенность?

Наиболее простой способ преодоления этой трудности заключается в применении эффективных систем заднего освещения, дающего силуэтное изображение объекта.

На рис. 2-12 изображена простейшая схема заднего освещения, в которой используется точечный источник света (дуга высокой интенсивности, мощная импульсная газоразрядная лампа или искровой разрядник) и собирающая линза, формирующая сходящийся пучок света и направляющая его в объектив киноаппарата. Снимаемый объект располагается в сходящемся пучке лучей на фоне линзы.

Схема заднего освещения, показанная на рис. 2-13, отличается тем, что вместо линзы здесь применено вогнутое сферическое зеркало. Точечный источник света, как и киносъемочный аппарат, находится на двойном фокусном расстоянии зеркала, то есть в центре кривизны сферического зеркала.

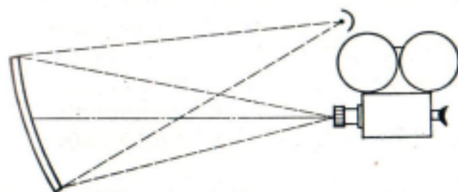


Рис. 2-13. Схема заднего освещения с помощью точечного источника света и вогнутого сферического зеркала

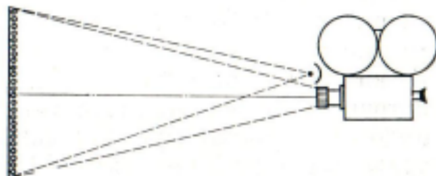


Рис. 2-14. Схема переднего и заднего освещения с помощью экрана «Скотчлит»

Для получения заднего освещения можно использовать ячеистый экран «Скотчлит» (рис. 2-14), действующий так же, как вогнутое зеркало. Лучи света, упавшие на такой экран под разными углами, не рассеиваются в разные стороны, а, отразившись от оптических элементов (шариков, вдавленных в зеркальную поверхность), снова возвращаются по тому же направлению, по которому

они падают на экран. Таким образом, лучи света, идущие от источника, в данном случае от импульсной лампы, отразившись от экрана, направляются к объективу киноаппарата. На кинопленке получается изображение объекта съемки, освещенного как спереди, так и сзади.

Для сверхскоростной киносъемки в отраженном свете, когда в течение короткого периода съемки (порядка 10^{-4} — 10^{-5} *с*) нужно обеспечить весьма высокую освещенность, применяют мощные вспышки импульсной газоразрядной лампы или искрового разрядника, а также световые импульсы лазера.

При съемке аппаратами с оптической или электронно-оптической коммутацией кадров, имеющими собственные органы экспонирования, одна мощная вспышка обеспечивает освещение объекта в течение всей съемки. В отдельных случаях используется несколько одинаковых источников света, работающих одновременно или последовательно.

Импульсные лампы, искровые разрядники и лазеры можно применять также в режиме повторяющихся вспышек, когда каждая вспышка служит для получения коротких выдержек. Импульсные источники света называются стробоскопическими, они применяются при съемке барабанными и искровыми киноаппаратами.

Стробоскопическое освещение возможно только короткими сериями вспышек ограниченной яркости, так как термическая емкость импульсных ламп не допускает продолжительной работы лампы в таком режиме. Увеличение же мощности импульсной лампы вызывает одновременное увеличение длительности каждой вспышки, а это ограничивает пригодность лампы для получения коротких вспышек.

Стремление повысить яркость отдельных вспышек и термическую емкость источника импульсного освещения привело к созданию искровой камеры, в которой электрическая искра образуется в атмосфере газовой смеси криптона и водорода, находящейся под давлением до 5 *атм*. Через искровую камеру можно пропускать энергию до 100 000 *Дж* (100 000 *Вт·с*) в одной серии вспышек. Возможно получать до 14 000 вспышек в серии при 4—8 *Дж* энергии на каждую вспышку с длительностью около 1 *мкс*. Такой искровой источник создает достаточную освещенность для экспонирования высокочувствительной кинопленки (400 ед. ГОСТ) при относительном отверстии объектива 1:5,6.

Искровые источники света небольшой мощности позволяют получать чрезвычайно короткие экспозиции — порядка нескольких миллиардных долей секунды (10^{-9} *с*), дают тем самым возможность получать серии кадров с весьма резким изображением на быстро движущейся кинопленке.

Стробоскопические источники света малой мощности применяются для съемки макрообъектов, когда требуются ультракороткие выдержки.

Чтобы от одного маленького искрового источника света получить одновременно заднее и боковое освещение макрообъекта, при-

меняют схему, изображенную на рис. 2-15. Искровой источник света *1* помещают позади коррегированного конденсора *2* (или светосильного объектива с большим диаметром зрачка) и фокусируют весь свет на входном зрачке съемочного объектива киноаппарата *6*. Это создает обычное силуэтное освещение. Чтобы добавить еще боковое освещение, устанавливают полупрозрачное зеркало *3*, отклоняющее часть световых лучей в сторону зеркала *4*, которое подсвечивает объект съемки *5* сбоку.

Взрывной источник света. Весьма мощный источник света с длительностью вспышки около 40 *мкс*, создающий освещенность на по-

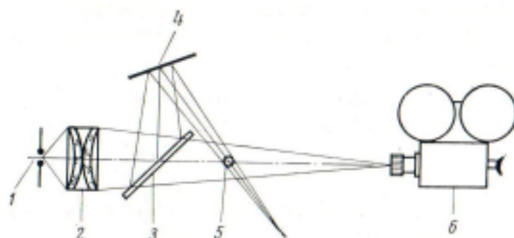


Рис. 2-15. Схема получения заднего и бокового освещения объекта съемки

верхности круга диаметром 0,5 *м*, в 10 000 раз бо́льшую, чем прямой солнечный свет, основан на явлении свечения газа под воздействием удара высокого давления.

Взрывной источник света (рис. 2-16) представляет собой цилиндр из плексигласа, внутри которого помещен свернутый в трубку прямоугольный лист взрывчатого вещества. Длина этого вкладыша составляет $^3/_5$ длины плексигласового цилиндра. С переднего конца отверстие цилиндра закрыто пластиной также из плексигласа, а заднее — круглой пробкой из того же взрывчатого вещества. Длина цилиндра зависит от требуемой длительности вспышки. При удлинении цилиндра на каждые 25 *мм* длительность вспышки увеличивается на 4 *мкс*.

В стенке цилиндра на расстоянии 25 *мм* от каждого его конца сделаны отверстия, предназначенные для удаления воздуха и заполнения цилиндра аргоном. Свернутый в трубку прямоугольный лист взрывчатого вещества образует щель, которая приходится против двух отверстий в стенке плексигласового цилиндра, допуская беспрепятственное наполнение его аргоном. Трубчатый вкладыш, пробка и окно приклеиваются к цилиндру с помощью пироксилинового клея.

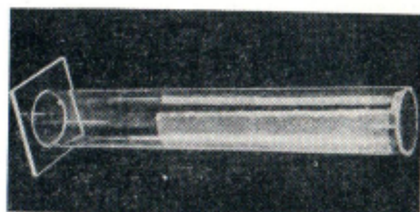


Рис. 2-16. Взрывной источник света

Заполнение плексигласового

цилиндра аргоном производится непосредственно перед съемкой. Взрыв пробки и трубчатого вкладыша инициируется с помощью электрического детонатора, поджигаемого разрядом электрического конденсатора.

При взрыве пробки и всего листа взрывчатки образуется сферическая ударная волна, двигающаяся вдоль цилиндра, а сходящиеся к центру трубки кумулятивные силы взрыва трубчатого взрывчатого вещества усиливают ударную волну, вызывая яркое свечение газа, которое зависит от величины давления во фронте ударной волны. Большое значение имеет при этом цилиндрическая форма взрывчатого вещества, приводящая к сложению ударных волн по осевой линии цилиндра, где и образуется наивысшая яркость свечения. Максимальная яркость свечения получается на десятой микросекунде после срабатывания детонатора.

Переднее окно взрывного источника света устанавливают на расстоянии 1,2—1,5 *м* от снимаемого объекта. При таком расположении обеспечивается равномерная освещенность около 1 млрд. *лк* в пределах круга диаметром 0,5 *м*. Такая освещенность вполне достаточна для сверхскоростной киносъемки на цветную кинопленку с микросекундными выдержками.

Освещенность может быть увеличена с помощью рефлектора, концентрирующего световой поток на меньшей площади. Для расширения освещаемой поверхности можно применить рассеивающую линзу перед выходным окном взрывного источника света.

Точность, с которой может быть осуществлен подрыв взрывчатого вещества, зависит от свойств детонатора и характеристик поджигающего импульса. Взрывной источник света при соблюдении правил обращения со взрывчатыми веществами является безопасным.

Лазер как источник освещения. Лазеры в качестве источников освещения при сверхскоростной киносъемке обладают преимуществами перед другими источниками света благодаря большой мощности излучения.

Мощность излучения современного импульсного лазера может достигать гигантских значений (до 10^{12} *Вт*), а длительность импульса излучения может иметь наперед заданное значение от 10^{-3} до 10^{-11} *с*. Частоту повторения импульсов можно варьировать в широких пределах.

В ряде случаев оказывается весьма важным и то, что свет, излучаемый лазером, является монохроматическим и когерентным.

Излучение лазера можно модулировать с помощью электрооптических фотозатворов с ячейкой Керра или ячейкой Поккельса.

В литературе появляется все больше и больше сообщений о применениях лазерных источников света при сверхскоростных киносъемках различных явлений в физике и других областях науки.

Скоростные фотозатворы. Применяемые при сверхскоростной киносъемке скоростные фотозатворы предназначены для выполнения следующих функций:

1) открывать доступ света в объектив киноаппарата только на короткий период съемки, ограниченный небольшим запасом кинопленки или фотопленки в аппарате, предотвращая повторное экспонирование или полную засветку фотографического слоя; такой фотозатвор является предохранительным, он срабатывает один раз за одну съемку;

2) осуществлять экспонирование каждого отдельного изображения (кадра) с ультракороткими выдержками и с высокой частотой повторения; эту функцию выполняют высокочастотные фотозатворы.

По принципу действия скоростные фотозатворы могут быть электромеханические, электродинамические, пневматические, взрывные, магнитооптические, электрооптические и электронные.

Функцию предохранительных могут выполнять фотозатворы, основанные на всех перечисленных принципах. В качестве высокочастотных используются безынерционные магнитооптические, электрооптические и электронные фотозатворы.

Предохранительные фотозатворы. В сверхскоростных киноаппаратах, работающих по принципу оптической коммутации кадров и растровому способу, оптическая система развертки кадров действует непрерывно, повторяя один и тот же цикл. В барабанном киноаппарате также кинопленка небольшой длины многократно проходит в фокальной плоскости объектива.

Во избежание повторного экспонирования светочувствительного слоя применяют различного рода устройства, которые открывают объектив только на период одного цикла развертки кадров или одного оборота барабана с кинопленкой. Когда же снимается лишь начальная стадия самосветящегося явления, то достаточно очень быстро перекрыть (отсечь) доступ света к пленке в определенный момент.

Электромеханические фотозатворы перекрывают пучки световых лучей с помощью механических деталей, которые приводятся в действие электромагнитом в сочетании с пружиной или электродвигателем. Время открытия или закрытия такого затвора составляет примерно 0,01 *с*, а минимальные выдержки достигают нескольких миллисекунд.

Взрывные фотозатворы действуют только «на закрытие» и перекрывают свет за несколько микросекунд. Действие взрывного затвора основано на быстром растрескивании стекла, когда по нему проходят волны механических возмущений, отчего стекло становится непрозрачным. Взрывной фотозатвор одноразового действия требует перезарядки перед каждой съемкой.

Высокочастотные фотозатворы. *Магнитооптический фотозатвор.* В 1845 году Фарадей обнаружил, что кусок стекла в сильном магнитном поле приобретает новые оптические свойства. Когда пучок лучей поляризованного света проходит сквозь стекло параллельно линиям магнитного поля, то плоскость поляризации света повора-

чивается на некоторый угол, зависящий от напряженности магнитного поля, длины пути пучка лучей в стекле и длины волны проходящего света.

Использование эффекта Фарадея в магнитооптическом фотозатворе показано на рис. 2-17. Здесь *1* и *3* — поляризационные светофильтры, поставленные «на темноту»; между ними расположена индукционная катушка *4* со стеклянным сердечником *2*. Когда на катушку подается импульс высокого напряжения, то плоскость поляризации световых лучей, выходящих из стеклянного сердечника, оказывается повернутой, совпадающей с плоскостью поляризации



Рис. 2-17. Магнитооптический фотозатвор

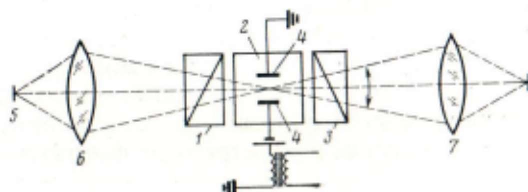


Рис. 2-18. Фотозатвор с ячейкой Керра: *1* — поляризатор; *2* — ячейка Керра; *3* — анализатор; *4* — электроды; *5* — источник света или объект съемки; *6* — объектив; *7* — объектив киноаппарата

второго поляризационного светофильтра (анализатора), который в этих условиях не оказывает препятствия прохождению света.

Магнитооптический фотозатвор, основанный на эффекте Фарадея, практически не обладает инерцией и дает возможность осуществлять экспозиции, определяемые лишь длительностью электрических импульсов, подаваемых на его обмотку.

Электрооптический фотозатвор с ячейкой Керра. Действие этого фотозатвора основано на открытом Керром в 1875 году явлении вращения плоскости поляризации света под воздействием электрического поля.

Фотозатвор с ячейкой Керра (рис. 2-18) представляет собой прозрачную плоскую кювету *2*, наполненную жидкостью (обычно нитробензолом $C_6H_5NO_2$), в которой расположены две металлические пластины *4* для создания в промежутке между ними электрического поля, направленного перпендикулярно пути лучей света. По обеим сторонам кюветы установлены скрещенные поляризационные светофильтры *1* (поляризатор) и *3* (анализатор). При отсутствии между пластинами электрического поля анализатор *3*, поставленный «на темноту», препятствует прохождению света. При наложении электрического поля в жидкости возникает двойное лучепреломление, и свет, выходящий из кюветы, оказывается поляризованным эллиптически. В световом потоке содержатся лучи, которые могут пройти через анализатор. В зависимости от разности потенциалов на пластинах будет изменяться величина проходящего через анализатор светового потока. При определенной разности потенциалов величина проходящего светового потока ста-

новится максимальной. Для максимального пропускания пучка световых лучей диаметром 5 *мм* необходимо приложить напряжение порядка 12 000 *В*.

Спектральная характеристика светопропускания фотозатвора с ячейкой Керра начинается от 420 *мкм* и доходит до ближней инфракрасной области. Контраст светопропускания 1:1000.

Быстрота реакции фотозатвора с ячейкой Керра ограничивается практически лишь скоростью подачи на пластины электрического напряжения, поэтому его можно считать безынерционным. Он дает возможность получать ультракороткие выдержки наносекундной и даже пикосекундной длительности. Частота повторения экспозиций не ограниченна. Вследствие полностью электрического действия

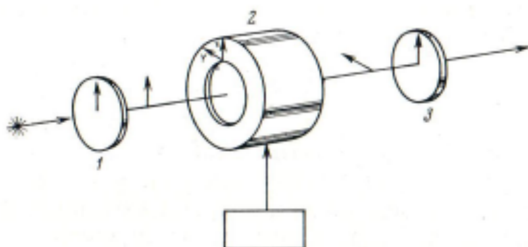


Рис. 2-19. Схема электрооптического фотозатвора Поккельса

фотозатвора с ячейкой Керра синхронизация его действия с моментом возникновения снимаемого процесса решается очень легко.

Недостатком фотозатвора с ячейкой Керра является его малая прозрачность, составляющая всего 7—10%, поэтому снимаемый объект должен обладать весьма высокой яркостью.

Электрооптический фотозатвор с ячейкой Поккельса. Открытое в 1893 году Поккельсом явление двойного лучепреломления и вращения плоскости поляризации при прохождении поляризованного света через кристаллы под воздействием на них электрического поля лежит в основе фотозатвора, получившего название ячейки Поккельса.

Наиболее часто применяются искусственно выращенные кристаллы фосфата аммония и фосфата калия. Эти кристаллы представляют собой четырехгранник в основании с пирамидальными головками. Из кристалла вырезается в определенном сечении пластина необходимого размера. К пластине с обеих сторон прикладываются прозрачные электроды, так как направление электрического поля должно совпадать с направлением прохождения через кристалл света. В качестве прозрачных электродов используются стеклянные пластины, на поверхность которых наносится тонкий слой хлорного олова. Полученная на стекле пленка обладает токопроводностью и в то же время почти прозрачна. Эти стеклянные пластины с электродами одновременно служат и для предохране-

ния весьма хрупкой и гигроскопичной пластины кристалла от влаги и механических повреждений.

Кристаллический элемент *2* с электродами устанавливается между двумя поляризационными светофильтрами: *1* и *3* (рис. 2-19), плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны (поставлены «на темноту»), так что свет, прошедший через поляризатор *1*, не пройдет через анализатор *3*, если кристалл не возбужден.

Под воздействием электрического поля одноосный кристалл становится двулучепреломляющим, свет, проходящий через него, приобретает эллиптическую поляризацию, и в световом потоке появится часть лучей, которая будет в состоянии пройти через анализатор *3*. Для получения максимального светопропускания необходимо подать на электроды напряжение 7500—10 000 *В*.

Прозрачность кристаллического электрооптического фотозатвора с ячейкой Поккельса в пределах области спектра от 350 до 1150 *мкм* достигает 30%. Контраст светопропускания равен приблизительно 1:1000. Фотозатвор практически безынерционный; он позволяет получать выдержки длительностью до 1 *нс*.

Кристаллический электрооптический фотозатвор с ячейкой Поккельса используется главным образом как модулятор света, излучаемого лазером. Современные лазеры дают возможность создавать гигантские импульсы света длительностью около 60 *нс* и мощностью до нескольких миллионов ватт.

Глава 3

ПОКАДРОВАЯ КИНОСЪЕМКА С ИНТЕРВАЛАМИ

Замедленная киносъемка с частотой меньшей, чем частота проекции кинофильма, позволяет увидеть на экране ускоренное движение.

Покадровая киносъемка с интервалами является разновидностью замедленной киносъемки, позволяющей ускорить движение на экране в неограниченное число раз. Такая киносъемка производится с помощью устройства, называемого цейтрафером, которое автоматически управляет киноаппаратом, снимающим по одному кадру через определенные, рассчитанные заранее интервалы времени. Это же устройство производит в необходимых случаях по заданной программе включение и выключение осветительных приборов. Поэтому покадровую киносъемку с интервалами называют также цейтраферной киносъемкой.

Многие явления природы, биологические, физические и химические процессы протекают настолько медленно, что в обычных условиях непосредственно наблюдать их развитие чрезвычайно трудно, а в ряде случаев невозможно. Цейтраферная киносъемка в этих случаях позволяет увидеть весьма и весьма медленные движения.

Процессы, для наблюдения и изучения которых необходима цейтраферная киносъемка, разнообразны. Укажем лишь на некоторые из них. Это прорастание семян, развитие и цветение растений, созревание плодов, деление и размножение живых клеток, развитие и рост живых организмов в различных условиях и под влиянием самых разнообразных факторов, образование и рост кристаллов, образование и распространение коррозии металлов, изменения структуры и деформация различных материалов под воздействием тепла, влаги и всевозможных видов радиации, растворение химических веществ, таяние льда и снега, движение ледников и смещение горных пород, формирование и движение облаков и грозовых туч, затмение солнца и луны, возникновение и развитие протуберанцев на солнце и т. д.

Широкое применение цейтраферная киносемка получила при изучении всевозможных технологических и производственных процессов с целью их совершенствования, при изучении трудовых про-

цессов в интересах НОТ, а также при изучении людских и транспортных потоков для лучшей организации их движения.

Характеристики процесса покадровой киносъемки с интервалами. Основными характеристиками этого процесса являются: 1) кратность ускорения движения при нормальной скорости кинопроекции снятого таким способом кинофильма и 2) длительность интервалов между экспонированием следующих один за другим кинокадров.

Кратность ускорения движения на киноэкране k определяется отношением длительности всего периода покадровой киносъемки T_c к продолжительности показа на экране снятого кинофильма $T_п$, то есть

$$k = \frac{T_c}{T_п}. \quad (3\text{-}1)$$

Кратность ускорения движения может быть вычислена также по формуле:

$$k = nU, \quad (3\text{-}2)$$

где n — частота кинопроекции, а U — интервал между экспозициями последующих кадров.

Если кинофильм будет демонстрироваться с нормальной частотой кинопроекции 24 *кадр/с*, то

$$k = 24U.$$

Расчет интервалов между экспозициями последовательных кадров производится по формуле:

$$U = \frac{T_c}{T_п n} = \frac{k}{n}. \quad (3\text{-}3)$$

Для случая проекции кинофильма с частотой 24 *кадр/с*

$$U - \frac{k}{24}. \quad (3\text{-}4)$$

Необходимо заметить, что под термином «интервал» следует понимать промежуток времени от *начала* экспонирования каждого предыдущего кадра до *начала* экспонирования последующего кадра.

Выдержка при съемке может быть различной, и она рассчитывается независимо от интервалов, исходя из условий освещения или скорости движения объекта съемки.

Покадровая киносъемка с интервалами от 0,5 до 5 *с* применяется обычно для фиксации процессов, длящихся от 20 *мин* до 1 *ч*. Процессы, длящиеся от 2 до 10 *ч*, снимают с интервалами от 5 до 60 *с*. Весьма медленные процессы, происходящие в течение нескольких суток, требуют интервалов от 5 *мин* до 2 *ч* и более.

В табл. 3-1 приведены необходимые кинооператору данные о цейтраферной киносъемке для интервалов от 1 *с* до 1 *ч*.

Таблица 3-1

Кратность ускорения движения, количество снимаемых кинокадров и расход кинопленки в зависимости от интервалов при цейтраферной киносъемке

Интервалы	Кратность ускорения движения (при проекции 24 *кадр/с*)	Число кинокадров, снимаемых в час	Расход кинопленки в час (*м*)	
			35-*мм*	16-*мм*
1 *с*	24	3600	68,40	27,43
2 »	48	1800	34,20	13,71
3 »	72	1200	22,80	9,14
4 »	96	900	17,10	6,85
5 »	120	720	13,68	5,48
6 »	144	600	11,40	4,51
7 »	168	514	9,77	3,92
8 »	192	450	8,55	3,43
9 »	216	400	7,60	3,05
10 »	240	360	6,84	2,74
15 »	360	240	4,56	1,83
30 »	720	120	2,28	0,91
1 *мин*	1440	60	1,14	0,46
2 »	2880	30	0,57	0,23
3 »	4320	20	0,38	0,15
5 »	7200	12	0,23	0,09
10 »	14400	6	0,12	0,046
30 »	43200	2	0,038	0,015
1 *час*	86400	1	0,019	0,0075

Цейтраферное устройство состоит из трех основных элементов (рис. 3-1):

1) интервалометра, вырабатывающего электрические импульсы через установленные интервалы времени;

2) электромагнитных реле, срабатывающих от импульсов напряжения, получаемых от интервалометра и включающих покадровый электродвигатель киноаппарата и осветительные приборы;

3) покадрового электродвигателя киноаппарата, обеспечивающего строго одинаковые выдержки.

В качестве интервалометра для получения электрических импульсов, управляющих покадровой съемкой, могут быть использованы механические замыкатели электрических контактов, как, например, контактные часы, или медленно вращающийся диск, или барабан, по окружности которого расположены штырьки, замыкающие при своем движении электрический контакт. В последнее время стали широко приме-

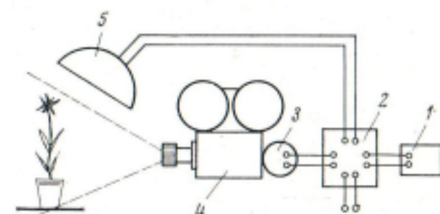


Рис. 3-1. Цейтраферное устройство:
1 — интервалометр; *2* — реле; *3* — покадровый электродвигатель; *4* — киноаппарат; *5* — осветительный прибор

няться интервалометры электронного типа. Их преимущество заключается в простоте, малых размерах и небольшой массе.

Работа электронного интервалометра основана на закономерности зарядки электрического конденсатора. Накопление заряда в конденсаторе при подключении его к источнику постоянного тока через резистор происходит постепенно. При этом одновременно на нем возрастает и напряжение. Скорость зарядки конденсатора зависит от напряжения источника тока, емкости конденсатора и резистора, включенного в цепь. При шунтировании заряженного конденсатора, то есть при его разрядке через резистор, напряжение падает также в зависимости от характеристик цепи. Таким образом, напряжение на конденсаторе может служить мерой времени, что и используется в интервалометре.

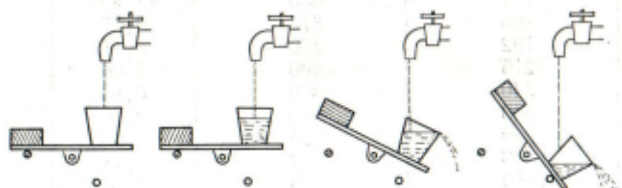


Рис. 3-2. Аналогия принципа действия электронного интервалометра

Автоматическое действие интервалометра осуществляется включением параллельно с накопительным конденсатором газоразрядной, например неоновой, лампы, которая имеет свойство зажигаться только тогда, когда напряжение на ее электродах достигает определенного значения, называемого потенциалом зажигания, а также при более высоком напряжении.

В цепь конденсатор — неоновая лампа может быть включено электромагнитное реле, которое с возникновением тока в цепи при загорании неоновой лампы сработает и включит пусковое устройство покадрового электродвигателя киноаппарата.

По аналогии этот процесс можно сравнить с действием устройства, изображенного на рис. 3-2. Сосуд, укрепленный на коромысле, наполняется водой из крана. На противоположном конце коромысла имеется груз, удерживающий сосуд в вертикальном положении. При наполнении сосуда до определенного предела, когда масса груза оказывается меньше массы сосуда с определенным количеством воды, сосуд опрокидывается и замыкает контакт. Вода из опрокинутого сосуда выливается, и груз возвращает сосуд в первоначальное положение. Цикл повторяется.

Интервалы времени, через которые будет происходить опрокидывание сосуда с водой, зависят от скорости подачи воды.

Время накопления заряда в электрическом конденсаторе определяется резистором в его электрической цепи. Изменением этого резистора регулируют интервалы между моментами срабатывания интервалометра.

Сравнительно слабые электрические импульсы, вырабатываемые интервалометром, приводят в действие электромагнитное реле, которое замыкает цепь питания электродвигателя киноаппарата.

Обычный электродвигатель не может развить полную мощность и мгновенно остановиться, сделав лишь один оборот ротора. Поэтому вал электродвигателя не сцепляют напрямую с главным валом механизма киноаппарата, а помещают между ними редуктор с автоматически действующим выключателем. Принципиальная схема такого устройства показана на рис. 3-3. Электродвигатель *1* вращает червячную шестерню редуктора *2*. На выходном валу *3* редуктора имеется шайба *4* с выемкой, в которую западает толкатель *5*, служащий для размыкания пары контактов *6* в цепи питания электродвигателя. Когда срабатывает соленоид *7*, получающий импульс тока от реле *8*, включаемого импульсом интервалометра, цепь электродвигателя замыкается, и его ротор начинает вращаться, передавая движение через редуктор главному валу киноаппарата. Посаженная жестко на выходном валу редуктора шайба *4* начинает вращаться и толкатель *5*, упираясь в обод шайбы, удерживает контакты *6* в замкнутом положении до тех пор, пока вал не сделает полный оборот и толкатель снова западет в выемку, перестав удерживать контакты, которые разомкнутся, выключив питание электродвигателя. На этом завершается цикл работы покадрового привода киноаппарата. Он повторяется при поступлении следующего импульса от интервалометра. Для непрерывной работы замыкают цепь электродвигателя с помощью выключателя *9*.

Устройство требует тщательной регулировки, так как ротор электродвигателя продолжает вращаться некоторое время по инерции после выключения тока.

Для цейтраферной киносъемки узкопленочным киноаппаратом с пружинным приводом, позволяющим съемку одиночными кадрами, используют соленоид, сердечник которого при появлении тока в его обмотке нажимает на пусковую кнопку.

В последнее время в узкопленочных киноаппаратах начинают находить применение шаговые, или гистерезисные, электродвигатели с электронным управлением, которые не требуют редуктора.

В промышленных установках для цейтраферной киносъемки интервалометр, электромагнитные реле, программное устройство, управляющее включением освещения несколько раньше, чем производится экспонирование кадра, и затем выключающее освещение, а также преобразователи тока для питания всех элементов установки смонтированы в одном чемодане. На рис. 3-4 приведена схема установки для цейтраферной киносъемки (фирма «Арнольд и Рихтер» — ФРГ), которая включается в однофазную сеть переменного тока 127 или 220 *В* и позволяет производить покадровую съемку с интервалами от 2 *с* до 3 *ч*.

Киноаппараты для цейтраферной киносъемки. Покадровую киносъемку с интервалами небольшой длительности и продолжающуюся не долго можно выполнить любым киноаппаратом, имею-

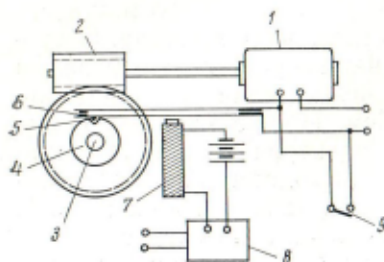


Рис. 3-3. Принципиальная схема механического устройства выключения покадрового электродвигателя киноаппарата

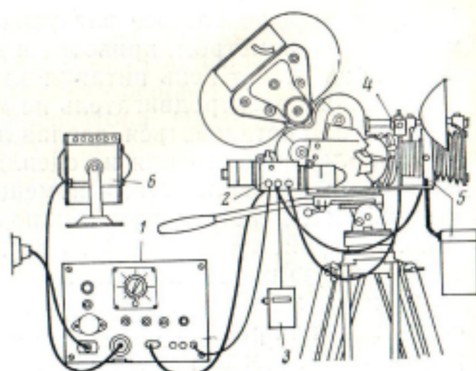


Рис. 3-4. Схема установки для цейтраферной киносъемки:
1 — интервалометр, реле и распределитель питания; *2* — электропривод; *3* — счетчик кадров; *4* — наружный обтюратор; *5* — импульсный осветитель; *6* — прожектор

щим вал покадрового привода (мультхода). Пригодны также все узкопленочные киноаппараты с пружинным приводом и устройством для покадровой съемки.

На киностудиях для покадровых киносъемок с интервалами используют в большинстве случаев обычные киносъемочные аппараты, основным назначением которых является киносъемка с нормальной частотой 24 *кадр/с*. К киноаппарату присоединяют покадровый электродвигатель, который управляется цейтраферным устройством.

Для покадровой киносъемки с интервалами применяют также специальные киноаппараты, так называемые регистрирующие фотокамеры (РФК). Наша отечественная промышленность изготовляет два типа регистрирующих фотокамер: РФК-5 (35-*мм*) (рис. 3-5) и РФК-1М (16-*мм*) (рис. 3-6).

Рассмотрим требования, которые следует предъявить к киносъемочному аппарату, предназначенному для покадровой киносъемки с интервалами.

1. Система визирования кадра должна давать возможность точно устанавливать кадр и фокусировать изображение в любое время в течение всего периода съемки.

Система сквозной наводки, когда изображение кадра рассматривают непосредственно на кинопленке в кадровом окне, не пригодна не только потому, что современные кинопленки имеют плотный или совершенно непрозрачный противоореольный слой, но также потому, что изображение видно только во время экспозиции, а в периоды интервалов кадровое окно перекрывается обтюратором.

Большие возможности предоставляет визирная система с зеркальным обтюратором, которая позволяет наблюдать изображение кадра на матовом стекле во время интервалов. Однако в течение

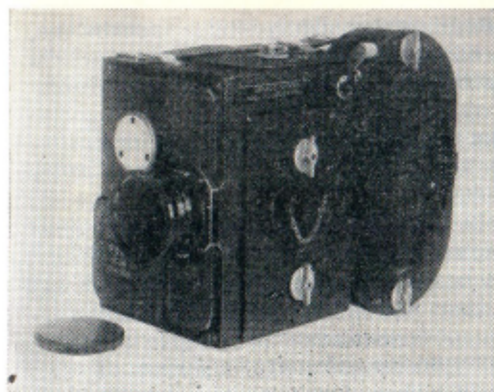


Рис. 3-5. Киноаппарат РФК-5

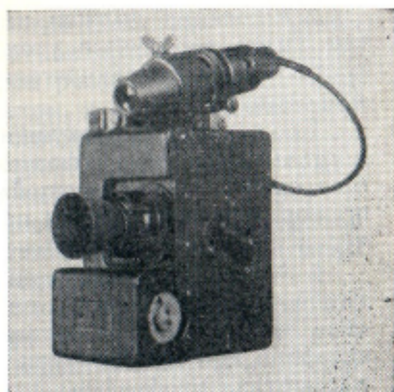


Рис. 3-6. Киноаппарат РФК-1М

экспозиции изображение не видно. Это затрудняет наблюдение кадра, когда съемка производится с длительными выдержками (например, ночью) и с короткими промежутками времени между экспозициями.

Существенный недостаток системы визирования с зеркальным обтюратором заключается в том, что при покадровой киносъемке с длительными интервалами отраженный от матового стекла рассеянный свет проникает к кадровому окну и вуалирует кинопленку. Поэтому при цейтраферной киносъемке аппаратом с зеркальным обтюратором приходится применять второй обтюратор, расположенный перед съемочным объективом, или выключать свет на время интервалов. Такой наружный обтюратор имеется в установке для цейтраферной киносъемки фирмы «Арнольд и Рихтер», в которой используется киноаппарат с зеркальным обтюратором «Аррифлекс-35» или «Аррифлекс-16» (см. рис. 3-4).

Лучшей является зеркально-рефлексная система видоискателя, в которой имеется светоделительная призма, расположенная между съемочным объективом и обтюратором обычного типа. Около 85% света призма пропускает к кадровому окну, а примерно 15% отводит к матовому стеклу. Такой видоискатель позволяет наблюдать изображение на матовом стекле непрерывно как во время интервалов, так и во время экспозиции. Немигающее изображение рассматривать удобнее, легче уточнять фокусировку и установку кадра.

2. Обтюратор должен иметь переменное раскрытие, чтобы регулировать выдержку. Для съемки очень медленных процессов бывает небходимо максимально снизить освещенность, что возможно, если увеличить соответственно выдержку. Наоборот, покадровая съемка производственных процессов, людских и транспортных потоков и других процессов с быстрым внутрикадровым движением требует коротких выдержек, чтобы избежать смазывания изображения.

3. Объектив должен иметь переменное фокусное расстояние, что позволяет лучше уточнять композицию кадра в ходе съемки постепенно развивающегося и меняющего свои размеры и положение объекта.

Так как точное фокусирование изображения возможно при полностью открытой диафрагме, то целесообразно, чтобы объектив был снабжен «прыгающей» диафрагмой, которая автоматически полностью раскрывается на время интервалов и так же автоматически становится на нужное деление на время экспозиции.

4. Киноаппарат должен быть оснащен экспозиционной автоматикой с замером света, прошедшего через объектив. Автоматическое экспозиционное устройство обеспечивает получение ровного негатива при меняющейся освещенности объекта съемки. Такая автоматика необходима также при цейтраферной киносъемке макрообъектов и киносъемке в сочетании с научными приборами: микроскопом, теневым, интерференционным или поляризационным прибором.

Аналогом объектива с переменным фокусным расстоянием, экспозиционной автоматикой и «прыгающей» диафрагмой является «Варио-свитар» фирмы «Керн-Пайяр» (Швейцария).

Все более расширяющиеся применения цейтраферной киносъемки в различных областях науки и техники вызвали появление новых киносъемочных аппаратов, которые, сохраняя возможности обычной киносъемки, позволяют производить также цейтраферную киносъемку с большим диапазоном интервалов.

Создание таких универсальных киносъемочных аппаратов, главным образом узкопленочных, стало возможно благодаря использованию достижений электронной техники, применению шаговых электродвигателей и элементов микроэлектроники.

Особенности цейтраферной киносъемки. Цейтраферная киносъемка, выполняемая с научными целями, иногда длящаяся много часов или даже несколько суток, должна быть подчинена течению снимаемого процесса. Начавшаяся съемка не может быть прервана, а затем снова продолжена без риска потери важных фаз в развитии изучаемого процесса.

Первая и главная задача при цейтраферной киносъемке заключается в том, чтобы получить ровный негатив, то есть экспонировать все следующие один за другим кадры одинаково и правильно. Если кадры будут отличаться от плотности, то изображение на экране будет «дышать», или мелькать.

При съемке на натуре переменная облачность может многократно изменять освещенность и спектральный состав света даже в течение короткого промежутка времени. Однако при правильном выборе места съемки, времени дня и метеорологических условий цейтраферную киносъемку на натуре в течение 3—5 *ч* выполнить бывает возможно.

Цейтраферную киносъемку в павильоне производят при стабилизированном искусственном освещении.

Вторая задача — обеспечение постоянства характера освещения снимаемых объектов. Сняв несколько кадров при прямом солнечном свете, нельзя продолжать съемку при рассеянном освещении, когда солнце закрыто набежавшим облаком, и далее в перемежку то при светотеневом, то при тональном освещении, даже если экспозиция как тех, так и других кадров будет оптимальная. Нужно либо выбрать подходящую погоду, когда небо безоблачное или, наоборот, облачность сплошная в течение всего времени покадровой киносъемки, либо перенести съемку в павильон (если это возможно) и создать там строго контролируемое освещение.

Цейтраферная киносъемка при солнечном освещении бывает в ряде случаев совершенно необходима, так как некоторые тропические растения плохо развиваются и не расцветают при искусственном освещении.

Третья задача — исключение помех, которые могут нарушить плавное течение снимаемого процесса.

Помехой при цейтраферной киносъемке на натуре является ветер. Нужно либо дождаться совершенно безветренной погоды, либо искусственно оградить объекты съемки от ветра. Многие биологические объекты снимают в оранжереях, где они защищены от ветра. Небольшие объекты можно предохранить от ветра, накрыв их прозрачным колпаком в виде ящика.

Снимаемые объекты должны быть защищены не только от ветра, но и от всех посторонних воздействий, равно как и от внезапного появления в снимаемом пространстве ненужных предметов.

Четвертая задача, которую при цейтраферной киносъемке приходится решать кинооператору как в натурных, так и в павильонных условиях заключается в необходимости в течение всего периода съемки уточнять композицию кадра и исправлять фокусировку.

Объект цейтраферной киносъемки движется или меняется в размерах весьма и весьма медленно. Направление движений в развитии процесса роста или изменений объекта в большинстве случаев невозможно предвидеть заранее при установке кадра в начале съемки. Возможны нарушения композиции кадра и выход из резкости сюжетно важных частей снимаемого объекта. Иногда процесс развития протекает с отклонениями от нормы. Уточнять композицию кадра и фокусировку изображения можно только во время интервалов. Делать это нужно чрезвычайно осторожно и точно рассчитанными едва заметными движениями, чтобы не нарушить плавность изображения на экране. Успех достигается тщательным предварительным изучением процесса, который нужно снять, а также опытом и терпением кинооператора.

Цейтраферная киносъемка дублей требует длительного времени и не всегда возможна, например, из-за короткого сезонного периода развития объектов съемки. По этой причине цейтраферную киносъемку целесообразно производить одновременно несколькими киноаппаратами, чтобы получить возможность выбрать лучший дубль или произвести монтаж из отобранных кусков кинопленки, снятых одновременно разными киноаппаратами.

Освещение при цейтраферной киносъемке в павильоне. Для цейтраферной киносъемки биологических объектов в павильоне или лаборатории требуется два вида искусственного освещения: 1) фотографическое, служащее созданию наиболее выразительного изображения и обеспечивающее нормальное экспонирование кинопленки; 2) биологическое, необходимое для стимулирования роста и развития снимаемого растения или живого организма.

Фотографическое освещение автоматически включается перед экспонированием каждого кадра и затем выключается на время интервала. Для этого вида освещения могут быть использованы источники как непрерывного свечения, так и импульсные лампы. Последние имеют то преимущество, что излучают холодный свет, близкий по спектральному составу к дневному, и дают короткие экспозиции. Типы и количество осветительных приборов определяются изобразительными задачами. Фотографическое освещение должно быть строго постоянным по освещенности и спектральному составу. Поэтому источники этого вида освещения должны получать питание через стабилизатор электрического напряжения.

Биологическое освещение должно соответствовать оптимальному световому режиму, который необходим для создания условий нормального развития биологического объекта. Спектральный состав света, освещенность и вызываемый светом нагрев объекта съемки являются частью общей задачи создания наиболее благоприятного для снимаемого объекта микроклимата. В решении этой задачи должны принимать участие специалисты, консультанты в данной области.

Глава 4

КРУПНОМАСШТАБНАЯ КИНОСЪЕМКА МЕЛКИХ ОБЪЕКТОВ (МАКРОКИНОСЪЕМКА)

Киносъемка мелких объемных объектов в крупном масштабе, выполняемая без применения микроскопа, называется **макрокиносъемкой.** Напомним, что масштабом изображения обозначают отношение размеров изображения предмета к его действительным размерам. При макрокиносъемке масштаб изображения снимаемых объектов может достигать 40:1. Макрокиносъемку в масштабе более крупном, чем 1:1, производят на специальном станке, аналогичном микрокиносъемочной установке.

Существует множество мелких объектов живой и неживой природы, которые можно подробно рассмотреть лишь с очень близкого расстояния, или пользуясь лупой. Сюда относится огромный мир насекомых и растений, различные вещества и горные породы, малоразмерные детали механизмов и точных приборов, а также многие другие объекты. Такие объекты слишком малы, чтобы снимать их обычным способом, но достаточно велики для съемки через микроскоп.

Особенности крупномасштабной киносъемки определяются необычными условиями, в которых происходит образование изображения, когда расстояние между снимаемым объектом и объективом киноаппарата чрезвычайно мало. Для фокусирования изображения объекта необходимо очень большое выдвижение объектива, что сопровождается уменьшением его относительного отверстия. При этом также уменьшается глубина резко изображаемого пространства и ухудшается резкость изображения.

При масштабе изображения 1:1 и диафрагме объектива 1:2 глубина резко изображаемого пространства (при диаметре кружка рассеяния, равном 0,025 *мм*) составляет всего 0,2 *мм*. Чтобы получить возможность снимать объемные предметы, необходимо сильно диафрагмировать объектив.

Выполнение киносъемки многих объектов, а особенно биологических, усложняется еще тем, что живые объекты (пчелы, муравьи, жуки и т. п.) быстро передвигаются. В условиях весьма жестких технических ограничений нужно суметь снять такие объекты достаточно выразительно, но не нарушая естественности их движений. Не меньшие трудности встречаются при съемке физических процес-

сов, как, например, образование пузырьков при кипении или падение капель жидкости и расплавленного металла.

При макрокиносъемке необходим точный расчет установочных данных, глубины резко изображаемого пространства и экспозиции.

Действие объектива при крупномасштабной съемке. Условия, в которых объектив образует крупномасштабное изображение, отличаются от условий образования изображения удаленных объектов. Обычные фотографические объективы рассчитаны для образования изображения предметов, каждая точка которых посылает в объектив пучки почти параллельных световых лучей. Когда же объект находится на очень близком расстоянии от объектива, пучки лучей света, идущие от каждой точки его, представляют собой конусы, основанием которых является входной зрачок объектива. Эти условия не соответствуют расчету коррекции объектива и существенно сказываются на его разрешающей силе. Кроме того, светосила объектива и глубина резко изображаемого пространства зависят от соотношения выходного и входного зрачков объектива.

В каждом фотографическом объективе имеется ирисовая диафрагма, служащая для регулирования проходящего через него светового потока, а также для изменения конуса световых лучей, от которого зависит глубина резко изображаемого пространства. Если смотреть на объектив с передней стороны, то мы увидим мнимое, в большинстве случаев увеличенное изображение диафрагмы; оно проецируется частью объектива, расположенной между диафрагмой и наблюдателем. Это изображение диафрагмы и является входным зрачком объектива, ограничивающим его действующее отверстие. Если же посмотреть на диафрагму с задней стороны объектива, мы увидим также мнимое, увеличенное или уменьшенное изображение той же диафрагмы. Отношение диаметра выходного зрачка объектива к диаметру входного называют масштабом зрачков объектива и обозначают $m_{зр}$.

Диаметры зрачков объектива можно измерить с помощью линейки с миллиметровыми делениями. Более точно это можно сделать с помощью точечного источника света, измеряя диаметры зрачков, проецируемых на лист бумаги, приложенной к объективу.

У многих объективов масштаб зрачков равен единице или немного отклоняется от этого значения. Некоторые современные широкоугольные объективы несимметричной конструкции имеют масштаб зрачков больше единицы, достигая значения 1,5. У большинства телеобъективов масштаб зрачков меньше единицы и равен всего лишь 0,4—0,7. В табл. 4-1 приведены значения масштаба зрачков некоторых кинообъективов.

Влияние масштаба зрачков на светосилу объектива и создаваемую им глубину резко изображаемого пространства будет рассмотрено ниже.

Экспонометрия макрокиносъемки. Способы расчета правильной экспозиции, применяемые при обычной киносъемке, когда выдви-

Таблица 4-1

Масштаб зрачков у некоторых объективов

Объектив	Фокусное расстояние, *мм*	Относительное отверстие	Масштаб зрачков
ОКС1-18-1	18	1:2,8	1,5
ОКС1-22-1	22	1:2,8	1,3
ОКС1-28-1	28	1:2,8	1,0
ОКС1-35-1	35	1:2	1,0
ОКС1-50-1	50	1:2	0,8
ОКС1-80-1	80	1:2	0,75
«Зоннар»	135	1:4	0,53

жение объектива для фокусирования изображения незначительно, не пригодны при крупномасштабной съемке.

Выдвижение объектива для фокусирования изображения чрезвычайно близко расположенных объектов настолько велико, что не учитывать вызванного этим уменьшения относительного отверстия объектива нельзя.

Коэффициент увеличения экспозиции или соответствующего повышения освещенности объекта при макрокиносъемке с объективом, имеющим масштаб зрачков $m_{зр}=1$, определяется формулой:

$$k = (1 + m)^2. \qquad (4\text{-}1)$$

Если масштаб зрачков объектива больше или меньше единицы, то коэффициент увеличения экспозиции определяется по формуле:

$$k = \left(1 + \frac{m}{m_{зр}}\right)^2. \qquad (4\text{-}2)$$

В табл. 4-2 приведены коэффициенты увеличения экспозиции при макросъемке для различных масштабов зрачков объектива.

Определение правильной экспозиции при макрокиносъемке производится следующим образом. Замеряется освещенность или яркость снимаемого объекта и вычисляется экспозиция для обычной съемки. Полученное значение экспозиции умножается на коэффициент увеличения экспозиции, который определяется по формуле (4-1) или (4-2) или же находится в табл. 4-2.

Лучшим решением проблемы экспонометрии при макрокиносъемке является применение киноаппарата с встроенным светоизмерительным устройством, замеряющим освещенность в плоскости матового стекла киноаппарата. Такие экспонометрические системы, как полуавтоматического, так и полностью автоматического типа, приобретают в настоящее время все большее распространение.

Глубина резко изображаемого пространства при макрокиносъемке. Чем крупнее масштаб изображения, создаваемого объективом, тем меньше глубина резко изображаемого пространства.

Таблица 4-2

Коэффициенты увеличения экспозиции при макросъемке

Масштаб изображения	Коэффициенты увеличения экспозиции при масштабе зрачков:								
	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5
0,1	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
0,2	2,0	1,8	1,6	1,6	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3
0,3	2,6	2,2	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,5	1,4
0,4	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6
0,5	4,0	3,3	2,9	2,6	2,2	2,0	1,9	1,9	1,8
0,6	4,8	4,0	3,4	3,0	2,6	2,2	2,1	2,0	2,0
0,7	5,8	4,6	4,0	3,5	2,9	2,5	2,4	2,2	2,2
0,8	6,8	5,4	4,6	4,0	3,2	2,8	2,6	2,5	2,3
0,9	7,8	6,2	5,2	4,5	3,6	3,1	2,8	2,7	2,6
1,0	9,0	7,1	5,8	5,0	4,0	3,4	3,1	2,9	2,8
1,5	16,0	12,2	9,8	8,2	6,2	5,1	4,6	4,3	4,0
2,0	25,0	18,7	14,8	12,2	9,0	7,1	6,4	5,9	5,4
3,0	49,0	36,0	28,0	22,6	16,0	12,2	11,0	9,9	9,0
4,0	81,0	58,7	45,3	36,0	25,0	18,8	16,7	15,0	13,6
5,0	121,0	87,0	66,3	52,6	36,0	26,7	23,6	21,0	18,9

Для симметричных объективов, входной и выходной зрачки которых приблизительно равны, глубина резко изображаемого пространства вычисляется по формуле:

$$G = 2kz' \left(\frac{1+m}{m^2}\right), \qquad (4\text{-}3)$$

где k — число диафрагмы объектива; z' — диаметр кружка нерезкости, который для съемки на 35-*мм* кинопленку принимается равным 0,025 *мм*, а для съемки на 16-*мм* кинопленку — 0,013 *мм*; m — масштаб изображения.

В табл. 4-3 приведены величины глубины резко изображаемого пространства, рассчитанные по формуле 4-3.

Для не симметричных объективов, имеющих $m_{зр}>1$ или $m_{зр}<1$, формула для определения глубины резко изображаемого пространства имеет следующий вид:

$$G = 2kz' \left(\frac{1+\frac{m}{m_{зр}}}{m^2}\right). \qquad (4\text{-}4)$$

Зависимость глубины резко изображаемого пространства от масштаба изображения графически представлена на рис. 4-1.

Сплошные линии относятся к объективам, имеющим масштаб зрачков $m_{зр}=1$; пунктирные кривые — к широкоугольным несим-

Таблица 4-3

Глубина резко изображаемого пространства при макросъемке, *мм*
(диаметр кружка нерезкости $z' = 0{,}025$ *мм*)

Масштаб изображения:	Диафрагма объектива:						
	1:2	1:2,8	1:4	1:5,6	1:8	1:11	1:16
0,1	11,0	15,4	22,0	30,0	44,0	60,5	88,0
0,2	3,0	4,2	6,0	8,4	12,0	16,5	24,0
0,3	1,44	2,01	2,88	4,02	5,76	7,9	11,5
0,4	0,87	1,1	1,7	2,2	3,5	4,8	7,0
0,5	0,6	0,84	1,2	1,68	2,4	3,3	4,8
0,6	0,44	0,62	0,88	1,24	1,77	2,4	3,4
0,7	0,37	0,52	0,74	1,16	1,46	2,1	2,8
0,8	0,28	0,39	0,56	0,78	1,12	1,5	2,2
0,9	0,23	0,33	0,46	0,66	0,94	1,4	1,9
1,0	0,2	0,28	0,4	0,56	0,8	1,1	1,6
1,5	0,11	0,16	0,22	0,32	0,44	0,6	0,9
2,0	0,07	0,1	0,14	0,2	0,3	0,4	0,6
3,0	0,04	0,06	0,08	0,12	0,18	0,24	0,4
4,0	0,03	0,02	0,06	0,08	0,12	0,17	0,24
5,0	0,02	0,03	0,04	0,06	0,9	0,13	0,19

метричным объективам ($m_{эр}=1{,}5$), а кривые, изображенные прерывистыми линиями, — к телеобъективам ($m_{эр}=0{,}5$).

Представленное семейство графиков показывает:

1) широкоугольные объективы несимметричной схемы дают меньшую глубину резкости, нежели телеобъективы; симметричные объективы занимают среднее положение;

2) глубина резко изображаемого пространства резко возрастает, начиная с масштаба $m=0{,}5$ (1:2). С этого масштаба и крупнее начинается область макросъемки, характеризующаяся особыми трудностями выполнения.

Поскольку глубина резко изображаемого пространства при макросъемке зависит от масштаба изображения, оказывается целесообразным производить макросъемку по возможности в менее крупном масштабе. Макросъемка на узкую кинопленку дает бóльшие возможности, чем на кинопленку 35-*мм*.

В табл. 4-4 приведено сравнение глубины резко изображаемо-

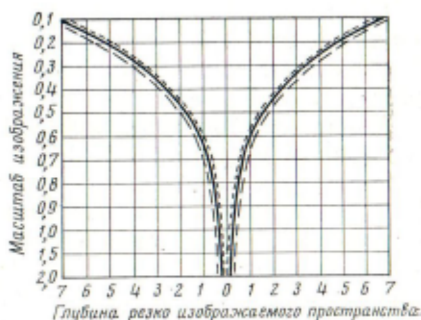


Рис. 4-1. Зависимость глубины резко изображаемого пространства от масштаба изображения

Таблица 4-4

Сравнение глубины резко изображаемого пространства, получаемой при макросъемке на 35- и 16-*мм* кинопленки

Кинопленка 35 *мм*, $z' = 0{,}025$ *мм*, диафрагма 1:8		Кинопленка 16 *мм*, $z' = 0{,}013$ *мм*, диафрагма 1:8	
Масштаб изображения	Глубина резко изображаемого пространства, *мм*	Эквивалентный масштаб изображения	Глубина резко изображаемого пространства, *мм*
0,1	44	0,05	84
0,5	2,4	0,25	4
1,0	0,8	0,5	1,2

го пространства при съемке на 35- и 16-*мм* кинопленки.

Из табл. 4-4 видно, что даже с учетом повышенных требований к резкости изображения на 16-*мм* кинопленке ($z'=0{,}013$ *мм*) по сравнению с требованиями к резкости на 35-*мм* кинопленке ($z'=0{,}025$ *мм*), все же глубина резко изображаемого пространства на 16-*мм* кинопленке получается значительно бóльшая. Эту важную особенность нельзя не учитывать при съемке научных кинофильмов.

Специальные объективы для макросъемки. Коррекция обычных фотографических объективов рассчитана для фокусирования изображения предметов, находящихся в бесконечности. Лишь очень немногие объективы способны давать достаточно резкие крупномасштабные изображения. К числу таких относятся, например, объективы «Дистагон» $f=50$ *мм*, 1:4 и «Планар» $f=80$ *мм*, 1:2. Эти объективы позволяют получать весьма резкие изображения как удаленных объектов, так и расположенных близко, когда величина их изображения близка к натуральной (масштаб 1:1).

Симметричные репродукционные объективы дают лучшее изображение при масштабе, близком 1:1, а объективы для фотоувеличителей дают вполне хорошие изображения при масштабах от 1:10 до 1:2.

Имеются объективы, которые специально рассчитаны для макросъемок в масштабах от 1:1 и крупнее. Наша отечественная промышленность изготовляет объектив «Корректар» (ОФ-111) $f=150$ *мм*, 1:6,3, рассчитанный для съемок в масштабах от 1:2 до 1:1, а также объективы типа «Планар» для съемок с увеличениями в пределах от 1:2 до 20:1. «Карл Цейсс Йена» (ГДР) изготовляет серию из четырех объективов для макросъемки в масштабах от 1:5 до 20:1. Каждый объектив рассчитан для получения максимально резкого изображения в определенном интервале увеличений.

Серии аналогичных объективов для макросъемки изготовляют и многие другие оптические фирмы.

В последнее время созданы новые панкратические объективы для крупномасштабной съемки. К числу таких относится, например, объектив «Тессовар» фирмы «Оптон» (ФРГ), дающий возможность изменять масштаб изображения от 0,8:1 до 12,6:1 при трех рабочих расстояниях. При первом рабочем расстоянии можно плавно менять масштаб изображения от 0,8:1 до 3,2:1; при втором — от 1,6:1 до 6,4:1 и при третьем — от 3,2:1 до 12,6:1. При каждом рабочем расстоянии можно производить плавное четырехкратное укрупнение или уменьшение масштаба изображения, то есть получать эффект «наезда» или «отъезда». При этом резкость и освещенность изображения остаются постоянными. Установка кадра и точное фокусирование изображения производится с помощью визира с отклоняющей призмой, аналогично системе визирования изображения в микрокиноустановках. Объектив «Тессовар» снабжен экспонометрическим устройством, замеряющим свет, прошедший через объектив.

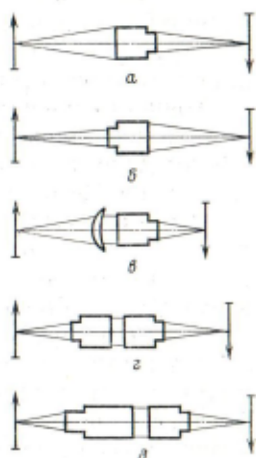


Рис. 4-2. Способы получения крупномасштабного изображения малоразмерных объектов

Способы получения крупномасштабного изображения. Имеется несколько способов получения крупномасштабного изображения малоразмерных объектов.

Первый способ (рис. 4-2, *а*) заключается в обычном расположении объектива по отношению к предмету и светочувствительному слою. Ввиду того что нормальная выдвижная оправа объектива киноаппарата недостаточна для фокусирования изображения предметов, расположенных на очень малом расстоянии, необходим дополнительный тубус. Величина необходимого дополнительного выдвижения объектива определяется по формуле:

$$\Delta f = mf, \tag{4-5}$$

где Δf — величина дополнительного выдвижения объектива; f — фокусное расстояние объектива; m — масштаб изображения.

Пример. Определить величину дополнительного выдвижения объектива $f=50$ *мм* для съемки в масштабе 0,5 (1:2):

$$\Delta f = 0{,}5 \cdot 50 = 25 \text{ мм}.$$

Расстояние между задней главной плоскостью объектива и плоскостью наводки в пространстве изображения находят из соотношения:

$$a' = f(1 + m). \tag{4-6}$$

Так как положение главных плоскостей в объективе не отмечено на оправе объектива (у обычных симметричных объективов они

совпадают с положением диафрагмы), то можно определить расстояние между плоскостью кинопленки (отмечается на корпусе киноаппарата) и плоскостью наводки в пространстве предметов. Эта величина вычисляется по формуле:

$$D = f\left(m + \frac{1}{m} + 2\right) + e, \quad (4\text{-}7)$$

где e — расстояние между главными плоскостями в объективе. Этой величиной можно пренебречь, так как у объективов симметричной конструкции (не широкоугольных и не телеобъективов) главные плоскости почти совпадают.

Точность расчетов установочных данных по формулам зависит от того, насколько указанные на оправе объектива данные соответствуют действительным их значениям. Существующие нормы на изготовление фотографических объективов допускают отклонение значения фокусного расстояния от указанного на оправе объектива до ±6%. Это означает, что объектив с $f=5$ *см* в действительности может иметь фокусное расстояние в пределах от 47 до 53 *мм*. Поэтому целесообразно испытать объектив, предназначенный для макросъемки, и определить его точные характеристики.

Масштаб изображения можно определить путем нанесения на матовое стекло киносъемочного аппарата миллиметровых делений. Тогда, установив в плоскости снимаемого предмета линейку с миллиметровыми делениями и совместив ее изображение с делениями на матовом стекле, легко вычислить значение масштаба изображения.

Второй способ (рис. 4-2, *б*). Объектив устанавливается в киноаппарате тыльной стороной к объекту съемки, а передней — в сторону кинопленки. Такая схема целесообразна при макросъемке с увеличением, то есть при масштабах изображения более крупных, чем 1:1. Установка объектива в перевернутое положение, подобно тому, как он устанавливается в фотоувеличительном аппарате, позволяет получить более резкое изображение.

Расчет величины выдвижения объектива и других установочных данных при перевернутом положении объектива такой же, как при первом способе.

Коэффициент увеличения экспозиции при макросъемке перевернутым объективом рассчитывается по формуле:

$$k = \left(\frac{1}{m_{зр}} + m\right)^2. \quad (4\text{-}8)$$

Глубина резко изображаемого пространства при съемке перевернутым объективом вычисляется по формуле:

$$G_{пер} = 2kz'\left(\frac{\frac{1}{m_{зр}} + m}{m^2}\right). \quad (4\text{-}9)$$

Третий способ (рис. 4-2, *в*) заключается в применении насадочной линзы для фокусирования изображения близко расположенно-

го объекта. Устанавливаемая перед объективом положительная (собирающая) линза позволяет исключить выдвижение объектива.

Фокусное расстояние системы объектив+насадочная линза может быть определено по формуле:

$$f_c = \frac{f_л f_o}{f_л + f_o - e}, \qquad (4\text{-}10)$$

где f_c — фокусное расстояние системы объектив+насадочная линза; $f_л$ — фокусное расстояние насадочной линзы; f_o — фокусное расстояние объектива киноаппарата; e — расстояние между задней главной плоскостью насадочной линзы и передней главной плоскостью объектива.

Когда насадочная линза располагается почти вплотную к передней линзе объектива, можно пользоваться упрощенной формулой:

$$f_c = \frac{f_л f_o}{f_л + f_o}. \qquad (4\text{-}10,\ a)$$

Существует также более простой способ использования насадочной линзы при макросъемке. Если объект поместить в передней фокальной плоскости насадочной линзы, то эта линза направит в объектив от каждой точки объекта параллельные пучки света, что соответствует случаю, когда снимаемый объект находится в бесконечности. Таким образом, линза будет служить в качестве коллиматора, формирующего параллельные пучки световых лучей. Причем одна и та же насадочная линза пригодна для фокусирования изображения любым объективом, независимо от его фокусного расстояния.

Применением насадочной линзы устраняется необходимость в дополнительном тубусе для объектива, однако ухудшается резкость изображения, особенно у краев кадра. Только специально рассчитанные для данного объектива ахроматические насадочные линзы могут дать удовлетворительную резкость по всему полю кадра.

Насадочная линза, применяемая в коллиматорном режиме, не изменяет относительного отверстия объектива. Поэтому расчет экспозиции и глубины резко изображаемого пространства может производиться как обычно.

Четвертый способ (рис. 4-2, *г*) представляет соединение в одну оптическую систему двух объективов, поставленных лицевыми сторонами один против другого. Такая система «тандем» позволяет сохранить как светосилу объектива, так и резкость изображения.

Система из двух объективов применяется при крупномасштабной съемке слабо освещенных или слабо светящихся объектов.

Передний объектив располагается тыльной стороной к объекту съемки, который помещается в фокальной плоскости этого объектива, чтобы изображение, образуемое им, находилось в ∞. Во второй объектив, поставленный нормально, поступают пучки параллельных лучей света, поэтому для него не требуется выдвижения.

3—654

Масштаб изображения, образуемого системой из двух объективов, зависит от отношения фокусного расстояния второго объектива к фокусному расстоянию первого объектива:

$$m = \frac{f_2}{f_1}. \qquad (4\text{-}11)$$

Пример. Если фокусное расстояние переднего объектива $f_1 = 50$ *мм*, а второго $f_2 = 100$ *мм*, тогда масштаб изображения будет равен

$$m = \frac{100}{50} = 2:1.$$

Освещенность изображения на кинопленке зависит от диаметра входного зрачка переднего объектива и соотношения выходного зрачка первого объектива и входного зрачка второго объектива. Если выходной зрачок переднего объектива больше входного зрачка второго объектива, то светосила переднего объектива не может быть использована полностью. Когда выходной зрачок переднего объектива меньше входного зрачка второго объектива, возникает виньетирование кадра (затемнение с углов).

Пятый способ (рис. 4-2, *д*) — соединение в одну систему вариообъектива и обычного объектива для получения возможности производства киносъемки с «наездом» на макрообъект.

Прямым путем, то есть постепенным приближением киноаппарата к макрообъекту, выполнить «наезд» практически невозможно, так как при этом потребовалось бы одновременно выдвигать объектив и открывать диафрагму. Поэтому единственная возможность получить эффект «наезда» при макрокиносъемке заключается в применении объектива с переменным фокусным расстоянием.

Хотя в настоящее время уже имеются вариообъективы, дающие возможность производить «наезды» также и в области крупномасштабной киносъемки, но такие объективы дороги и не всегда имеются под рукой.

При макрокиносъемке с постепенным укрупнением изображения вариообъектив, используемый в системе тандем, устанавливается тыльной стороной к объекту съемки. Второй объектив (обычного типа) должен быть светосильным и длиннофокусным, чтобы избежать виньетирования кадра при больших углах изображения вариообъектива.

Оборудование для макрокиносъемки. Макрокиносъемка требует высокой точности фокусирования изображения объекта, расчета глубины резко изображаемого пространства и коэффициента увеличения экспозиции.

При макрокиносъемке наводку на фокус производят не передвижением объектива вперед и назад, а изменением расстояния между снимаемым объектом и киноаппаратом, объектив которого предварительно установлен для получения резкого изображения в заданном масштабе. Дело в том, что изменение сопряженного фокусного

расстояния объектива вызывает нарушение расчетных данных, а именно — коэффициента увеличения экспозиции и глубины резко изображаемого пространства.

Макрокиносъемку в крупном масштабе начиная примерно от 1:2 и крупнее производят на специальной установке, которая обеспечивает высокую точность и удобство работы.

Схема горизонтальной установки для макрокиносъемки, используемой в условиях натуры и павильона, показана на рис. 4-3. Киноаппарат (со штативной головкой или без нее) и предметный столик

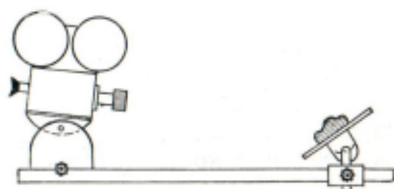


Рис. 4-3. Схема горизонтальной установки для макрокиносъемки

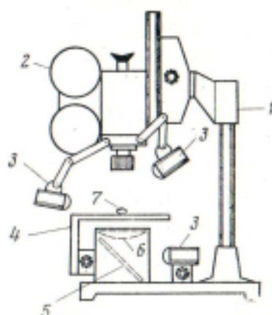


Рис. 4-4. Промышленная установка для макросъемки вертикального типа:
1 — кронштейн; *2* — киноаппарат; *3* — осветительные фонарики направленного света; *4* — подъемный предметный столик; *5* — отклоняющее зеркало для освещения объекта проходящим светом; *6* — линза (коллектив); *7* — объект съемки

установлены на направляющем устройстве типа оптической скамьи. Установка должна быть достаточно стабильна, чтобы исключить вибрации, а направляющие призмы или трубы должны допускать свободное и плавное перемещение киноаппарата вдоль направляющих.

В качестве установки для макрокиносъемки часто используют настольный (часовой) токарный станок. На суппорт станка крепят киноаппарат, который получает возможность передвижения как вдоль, так и поперек основных направляющих призм. Предметный столик закрепляют на станке неподвижно или изготовляют специальную стойку, допускающую наклоны и повороты объекта.

Промышленные установки для макросъемки, как правило, бывают вертикального типа (рис. 4-4). Перемещение киноаппарата вверх и вниз производится с помощью кремальеры. Предметный столик можно поднимать, опускать, смещать в любую сторону и поворачивать на 360°, что необходимо для установки кадра и исправления композиции в ходе съемки. Установка оборудована миниатюрными осветительными приборами.

Необходимость внесения поправок в композицию кадра и уточнения фокусировки изображения при макросъемке встречается чаще, чем при обычной киносъемке, так как движения биологических макрообъектов чрезвычайно разнообразны и произвольны.

Необходим киноаппарат, позволяющий наблюдать кадр на матовом стекле визирной системы в любой момент в течение съемки. Желательно, чтобы изображение кадра на матовом стекле во время работы киноаппарата было немерцающим. К сожалению, этой возможностью не обладают киноаппараты с зеркальным обтюратором. Вращающийся обтюратор хотя и позволяет следить за изображением кадра во время съемки, но исключает возможность точного корректирования резкости вследствие сильного мерцания.

Условиям макрокиносъемки лучше отвечают киносъемочные аппараты с призменной системой видоискателя, так как дают возможность наблюдать на матовом стекле немерцающее изображение кадра. Аналогами таких киноаппаратов являются «Болекс-Н16-рефлекс» (Швейцария) и «Пате-Вебо» (Франция).

Значительно облегчает выполнение макрокиносъемки применение встроенного в киноаппарат экспонометрического устройства, замеряющего освещенность изображения в плоскости матового стекла визирной системы. Такое устройство освобождает кинооператора от производства экспозиционных расчетов.

Освещение объектов при макрокиносъемке. При макрокиносъемке общие задачи операторской работы со светом такие же, как и при обычной киносъемке, но технические приемы иные.

Две особенности отличают технику освещения при макрокиносъемке:

1) трудность использования киноосветительных приборов для осуществления различных схем освещения мелких объектов из-за малого рабочего расстояния между объективом киноаппарата и снимаемым объектом;

2) необходимость работы при значительно более высоких уровнях освещенности, чем при обычных павильонных киносъемках.

Уменьшение светосилы объектива при фокусировании на близкие расстояния и диафрагмирование объектива для получения минимально достаточной глубины резко изображаемого пространства сопровождается требованием соответственного повышения освещенности объекта съемки.

Если при нормальной киносъемке в павильоне при диафрагме 1 : 4 и светочувствительности кинопленки 130 ед. ГОСТ освещенность объекта должна быть равна 1500 *лк*, то при макрокиносъемке, например, пчелы в масштабе 1 : 2 при диафрагме 1 : 22 необходима освещенность в 72 раза бóльшая, то есть 108 000 *лк*.

Необходимо заметить, что для съемки этого же кадра на 16-*мм* кинопленку требуется в три раза мѐньшая освещенность (36 000 *лк*), так как масштаб изображения необходим более мелкий (1 : 4) и глубина резко изображаемого пространства будет получена при диафрагме 1 : 16.

Высокая освещенность вызывает чрезмерный нагрев объектов съемки. Биологические объекты в этих условиях изменяют характер своих движений или вообще погибают. Неживые объекты также не всегда могут переносить нагрев. Поэтому необходимо принимать меры, во-первых, к снижению освещенности объектов путем рационального использования съемочной оптики и применением высокочувствительной кинопленки; во-вторых, к уменьшению тепловой радиации посредством теплопоглощающих светофильтров, отражателей с интерференционным зеркальным покрытием или путем при-

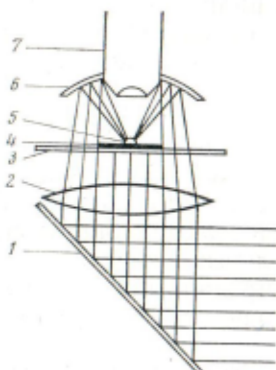


Рис. 4-5. Получение переднего освещения объекта с помощью вогнутого зеркала, установленного на объективе:
1 — отклоняющее зеркало; 2 — конденсор; 3 — стекло предметного столика; 4 — непрозрачная пластинка; 5 — объект съемки; 6 — сферическое зеркало с отверстием в середине; 7 — объектив кинокамеры

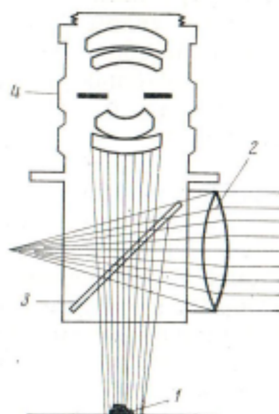


Рис. 4-6. Устройство для получения лобового освещения объекта при макросъемке:
1 — объект; 2 — конденсор; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — объектив киноаппарата

менения источников холодного света — ксеноновых и импульсных ламп.

В натурных условиях целесообразно использовать в качестве подсветов маленькие плоские или вогнутые зеркала, укрепленные на кронштейнах с шарнирами к киноаппарату или подставке для объекта съемки. Для смягчения резких теней зеркала можно запудрить или накрыть капроновыми сетками белого цвета.

В павильоне или лаборатории используют малогабаритные кинопрожекторы КПЛ-10 и осветительные приборы от микроскопа с лампами накаливания (ОИ-19, ОИ-24 и др.).

В последнее время разработаны и начали находить применение импульсные источники света, синхронизированные с киноаппаратом.

Большую трудность при макрокиносъемке представляет осуществление переднего и лобового освещения объектов, снимаемых

с большими увеличениями, когда расстояние между объективом киноаппарата и объектом съемки чрезвычайно мало. Для преодоления этой трудности в установках для макросъемки, изготовляемых некоторыми фирмами, имеются специальные устройства. Первое из них изображено на рис. 4-5. Это вогнутое зеркало с отверстием в середине, укрепляемое на объективе, которое действует так же, как опак-иллюминатор микроскопа. Аналогичное освещение создает импульсный кольцевой осветитель, расположенный вокруг объектива.

Второе устройство (рис. 4-6) укрепляется на объективе, как бленда. Внутри цилиндра имеется полупрозрачное зеркало, расположенное под углом 45°к оптической оси объектива. Направленный на зеркало сбоку через отверстие в цилиндре пучок световых лучей от осветительного прибора частично отражается вниз и освещает снимаемый объект от объектива, то есть создает эффект лобового освещения.

Макрокиносъемка на широкоэкранный кадр. Получение широкоэкранного кадра при макрокиносъемке может быть осуществлено:

1) добавлением к анаморфотному съемочному объективу насадочной оптической системы, действующей, как коллиматор, и направляющей в анаморфот пучки параллельных лучей;

2) съемкой обычным способом на кашированный кадр с расчетом на последующую печать с анаморфированием по вертикали по системе «Техникоп».

Второй способ предпочтительнее вследствие того, что съемка с анаморфотом вызывает трудность получения достаточной глубины резко изображаемого пространства. Он использует преимущества, свойственные съемке на уменьшенный формат кадра.

Глава 5

МИКРОКИНОСЪЕМКА

Микроскоп служит для получения увеличенного изображения чрезвычайно мелких объектов, структуру которых невозможно увидеть невооруженным глазом.

Микрофотография позволяет фиксировать изображение, наблюдаемое с помощью микроскопа, а микрокиносъемка способна отображать движущуюся картину и создавать условия для подробного изучения процессов, многие из которых длятся в течение часов, дней и недель, другие же, наоборот, происходят настолько быстро, что непосредственное наблюдение их невозможно. Микрокиносъемка является поэтому совершенным средством научной документации и исследования, обеспечивающим многократное воспроизведение на экране течение изучаемого процесса.

Современная техника микроскопии весьма разнообразна. Существуют микроскопы световые, электронные и растровые электронные.

В световом микроскопе увеличенное изображение объекта образуется при помощи стеклянных линз, формирующих пучки световых лучей.

В электронном микроскопе вместо лучей световых действуют пучки движущихся электронов, направляемых и фокусируемых электростатическими или электромагнитными «линзами». Изображение, создаваемое электронами, наблюдают на экране, покрытом катодолюминофором. Кроме того, электроны способны воздействовать на фотографический слой, вызывая на нем появление скрытого изображения.

В растровом электронном микроскопе сочетается принцип электронного микроскопа со сканированием — основным принципом телевизионной техники с образованием изображения на телевизионном экране.

Киносъемка через световой микроскоп. Оптическая система светового микроскопа (рис. 5-1) состоит из объектива, окуляра и осветительного устройства с конденсором. Объектив микроскопа образует действительное увеличенное изображение объекта вблизи

переднего фокуса окуляра. Это первичное изображение, созданное объективом, рассматривается через окуляр, выполняющий роль лупы. Он увеличивает первичное изображение до размеров достаточно крупных, чтобы различить мелкие детали строения объекта с наиболее удобного для зрения расстояния 250 *мм*. Таким образом, при визуальном наблюдении видимая в микроскопе картина представляет собой вторично увеличенное окуляром мнимое изображение, прямое по отношению к первичному изображению и обратное по отношению к объекту. Осветительное устройство служит для равномерного освещения объекта. Оно состоит из конденсора, апертурной диафрагмы и зеркала, направляющего свет от источника в оптическую систему микроскопа.



Рис. 5-1. Оптическая схема светового микроскопа:
1 — источник **света;** *2* — конденсор; *3* — объект; *4* — объектив; *5* — первичное изображение; *6* — окуляр; *7* — глаз

Предельная разрешающая сила светового микроскопа, его способность давать возможность различать раздельно две близко расположенные точки или линии определяется формулой:

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}, * \qquad (5=1)$$

где d — расстояние между соседними точками рассматриваемого объекта; λ — длина световой волны; n — показатель преломления среды между объектом и фронтальной поверхностью объектива микроскопа; α-апертурный угол объектива микроскопа (половина угла лучевого конуса, исходящего от элементарной точки рассматриваемого объекта, основанием которого является входное отверстие объектива).

Следовательно, граница разрешения светового микроскопа лежит около $^1/_2$ длины световой волны. При самом коротковолновом видимом фиолетовом свете, длина волны которого λ равна 400 *мкм*, разрешение составляет приблизительно 200 *мкм* (0,2 *мк*). А так как глаз человека в оптимальных условиях зрения с расстояния 250 *мм* различает две соседние точки или линии с промежутком около 0,2 *мм*, то полезное увеличение светового микроскопа равно около 1000 крат.

Путем перехода от прямого наблюдения к способу фотографирования в невидимых ультрафиолетовых лучах с длинами волн короче 300 *мкм* разрешающую силу ультрафиолетового микроскопа удалось повысить почти в два раза, получив возможность различать (на снимке) мельчайшие детали с промежутком между ними до 0,1 *мкм*. Однако удвоение разрешающей силы светового микроскопа недостаточно, чтобы существенно расширить возможности получать новые сведения о строении многих объектов.

* Произведение $n \sin \alpha$ является важнейшей характеристикой микроскопа и называется численной апертурой.

Световой микроскоп обычного типа позволяет наблюдать и фотографировать объекты, имеющие разное поглощение или отражение света в различных участках и образующих заметный контраст.

С помощью введения в микроскоп дополнительных оптических средств можно расширить объем получаемой информации.

Так оптическими средствами можно сделать видимой структуру некоторых прозрачных и бесцветных препаратов, которая невидима при обычных методах исследования. Отдельные участки таких препаратов отличаются от окружающей среды не оптической плотностью, а по показателю преломления света. Световые волны, проходящие через них, претерпевают различные изменения по фазе и приобретают «фазовый рельеф», который не способны обнаружить ни глаз, ни фотографический материал, чувствительные только к изменению интенсивности света. С помощью особого оптического устройства представляется возможность преобразовать фазовые изменения в изменения аплитудные и получить видимое изображение.

Интерференционный микроскоп позволяет применить метод интерферометрии и по интерференционному изображению определить некоторые количественные характеристики объекта, например концентрацию вещества в нем.

При введении в микроскоп поляризационных светофильтров можно обнаруживать явление анизотропии, присущее некоторым объектам, например кристаллам, и получать данные о их строении.

Освещая препарат ультрафиолетовым светом, способным вызывать флуоресценцию в некоторых веществах, можно обнаружить присутствие этих веществ в препарате, а по цвету свечения определить их.

Фотографирование в невидимых ультрафиолетовых или инфракрасных лучах бесцветных в видимой области спектра объектов позволяет увидеть их структуру.

Соединение киноаппарата со световым микроскопом. Световой микроскоп, предназначенный для визуального наблюдения, образует изображение в бесконечности. Хрусталик глаза формирует действительное изображение на сетчатке глаза (рис. 5-2). По этому принципу можно соединить микроскоп с киносъемочным аппаратом.

Объектив киноаппарата создает действительное изображение предмета на светочувствительном слое кинопленки, если он установлен на бесконечность. При этом необходимо выполнить два условия: во-первых, угол поля зрения глазной линзы окуляра должен быть больше, чем угол поля изображения объектива киноаппарата; во-вторых, выходной зрачок окуляра микроскопа должен по возможности ближе примыкать к входному зрачку объектива киноаппарата.

Угловое поле зрения окуляров микроскопа бывает от 30 до 36°, а некоторые компенсационные окуляры имеют поле зрения до 50°. С таким компенсационным окуляром можно соединить киноаппарат

с объективом, имеющим угол поля изображения до 40°, и виньетирования кадра не будет.

Соединение микроскопа с киноаппаратом должно производиться на прочной жесткой установке, позволяющей закрепить киноаппарат в нужном положении относительно микроскопа. Необходимо по возможности точнее совместить оптические оси микроскопа и киноаппарата, а затем приблизить киноаппарат к микроскопу настолько,

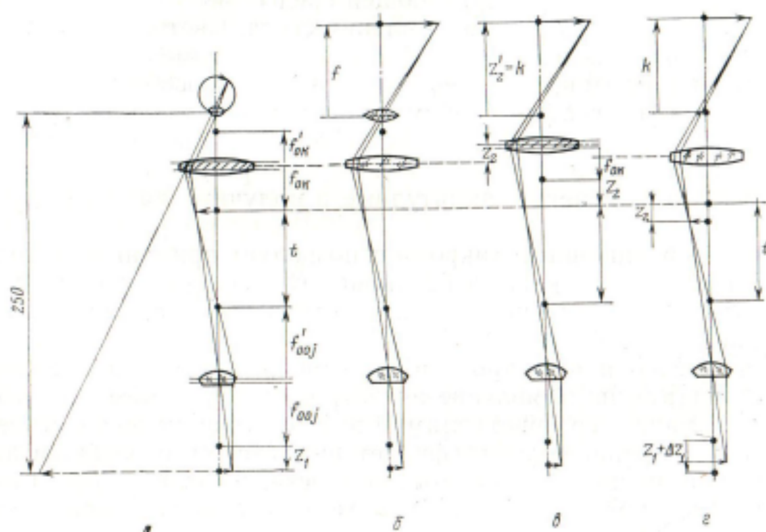


Рис. 5-2. Способы соединения киноаппарата со световым микроскопом:
а — схема микроскопа, настроенного для визуального наблюдения; *б* — схема получения изображения на кинопленке с помощью объектива киноаппарата; *в* — схема получения изображения на кинопленке с помощью приподнятого окуляра; *г* — схема получения изображения на кинопленке путем увеличения расстояния между объектом и объективом микроскопа

чтобы выходной зрачок окуляра микроскопа совпал с передней линзой объектива киноаппарата.

Изображение выходного зрачка микроскопа располагается на расстоянии от 4,5 до 15 *мм* от верхней поверхности глазной линзы окуляра. Это изображение может быть обнаружено с помощью листка тонкой полупрозрачной бумаги, передвигаемой вверх-вниз над окуляром. Там, где световой пучок имеет наименьшие размеры, и находится изображение выходного зрачка микроскопа.

Масштаб изображения предмета, которое получается в кадровом окне киноаппарата, выражается произведением увеличения объектива микроскопа $V_{\text{об.м}}$ на увеличение, даваемое совместно окуляром микроскопа $V_{\text{ок}}$ и объективом киноаппарата $V_{\text{об.к}}$:

$$V_{\text{общее}} = V_{\text{об. м}} \times (V_{\text{ок}} + V_{\text{об. к}}). \qquad (5\text{-}2)$$

Совместное увеличение окуляра микроскопа и объектива киноаппарата равно:

$$V_{\text{ок}} + V_{\text{об.к}} = \frac{f_{\text{об.к}}}{f_{\text{ок}}}. \qquad (5\text{-}3)$$

Фокусное расстояние объектива киноаппарата всегда известно; на окуляре микроскопа указывается лишь его увеличение. Фокусное расстояние окуляра микроскопа можно вычислить по формуле:

$$f_{\text{ок}} = \frac{250}{V_{\text{ок}}}. \qquad (5\text{-}4)$$

Имеется возможность получить одинаковый масштаб изображения при разных сочетаниях окуляра микроскопа и объектива киноаппарата. Так, например, если объектив микроскопа дает увеличение 20^{x}, то применив окуляр с увеличением 5^{x} и объектив киноаппарата $f=50$ *мм*, получим окончательное увеличение на кинопленке 20^{x}. Такое же увеличение будет получено, если взять окуляр с увеличением 20^{x} и объектив киноаппарата $f=12{,}5$ *мм*.

Этот способ соединения киноаппарата с микроскопом применяют главным образом при съемке на узкую 16- или 8-*мм* кинопленку.

Необходимо заметить, что объективы с переменным фокусным расстоянием не могут быть применены для соединения с микроскопом с целью получения переменного увеличения вследствие перемещающегося положения входного зрачка одновременно с изменением фокусного расстояния и вызываемого этим меняющегося виньетирования изображения кадра. Невиньетированный кадр может быть получен только в крайней длиннофокусной позиции вариообъектива.

Использование окуляра микроскопа для переноса изображения на кинопленку. Окуляр микроскопа может быть использован в качестве объектива для образования изображения микрообъекта без объектива киноаппарата.

Промежуточное изображение, образуемое объективом микроскопа, при визуальном наблюдении почти совпадает с передним главным фокусом главной линзы окуляра, которая посылает в пространство параллельные пучки световых лучей. Чтобы с помощью окуляра получить действительное изображение на конечном расстоянии, равном расстоянию до кинопленки в кадровом окне киноаппарата, нужно переместить промежуточное изображение, образованное объективом микроскопа и являющееся объектом для дальнейшего увеличения окуляром, немного дальше за передний фокус окуляра. Это можно осуществить двумя способами.

Первый способ — увеличить расстояние между объективом и окуляром микроскопа (рис. 5-2, *а*) так, чтобы промежуточное изображение оказалось за пределами переднего фокуса окуляра. Величина выдвижения окуляра определяется формулой:

$$z' = \frac{f_{\text{ок}}^2}{K}, \qquad (5\text{-}5)$$

где K — оптическая длина камеры, то есть расстояние от окуляра микроскопа до плоскости кинопленки в киноаппарате.

Резкость изображения при этом способе не ухудшается, так как расчетные расстояния для объектива микроскопа не нарушаются.

Второй способ — увеличить расстояние между предметом и объективом микроскопа, или, иными словами, отодвинуть весь микроскоп от предмета (рис. 5-2, *б*); при этом сопряженное расстояние до изображения, образуемого объективом микроскопа, уменьшится, и окуляр будет действовать, как объектив, создавая действительное изображение на кинопленке.

Из-за нарушения расчетных расстояний для объектива микроскопа качество изображения при этом способе заметно ухудшится.

Применение МФ-проектива. МФ-проектив представляет собой корригированную оптическую систему, устанавливаемую на микроскоп взамен окуляра, дающую действительное изображение на рассчитанном расстоянии. Он может быть применен при строго определенной длине камеры. Обычно МФ-проективы рассчитаны для оптической длины камеры 125 *мм*. Чтобы отличить МФ-проективы от обычных окуляров, на их оправах указаны не кратности увеличения, а масштабы изображения.

Масштаб изображения, получаемого в кадровом окне киноаппарата, определяется формулой:

$$V_{\text{общее}} = V_{\substack{\text{объектива} \\ \text{микроскопа}}} \times V_{\text{проектива}}. \qquad (5\text{-}6)$$

МФ-проективы, предназначенные для работы совместно с объективами-апохроматами, действуют, как компенсационные окуляры, исправляя аберрации и кривизну поля изображения; они обозначаются буквой К. Для работы с объективами-ахроматами имеются МФ-проективы без компенсации.

Киносъемка с одним объективом микроскопа. Если киносъемка производится одним объективом-ахроматом слабого увеличения без окуляра, то качество изображения будет вполне удовлетворительным. Для устранения остаточной хроматической аберрации применяют желто-зеленый светофильтр.

Объективы-апохроматы без компенсационного окуляра дают изображение с неустраненной хроматической аберрацией и сильной кривизной поля.

Поскольку микрообъективы весьма чувствительны к нарушению расчетных расстояний, при их использовании для киносъемки без окуляра необходимо устанавливать на микроскопе укороченный тубус, чтобы совместить плоскость кинопленки в киноаппарате с первичным изображением нормально сфокусированного объектива микроскопа.

Имеются специальные объективы для съемки без окуляра до масштаба 40 : 1. По существу, это объективы для макросъемки. Они имеют диафрагму и стандартную оправу для установки в поворотное устройство микроскопа.

Визирование изображения при микрокиносъемке. Способ установки кадра и уточнения фокусировки изображения по матовому стеклу киноаппарата не вполне удовлетворяет условиям микрокиносъемки. Структура матовой поверхности стекла, по которому производится наводка на фокус, является слишком грубой для изображения деталей микрообъектов. Поэтому предпочтительнее применить оптический видоискатель без матового стекла. Желательно также, чтобы видоискатель не зависел от положения обтюратора в киносъемочном аппарате и позволял вести наблюдение как во время промежутков времени между съемками кадров, так и во время экспонирования кадров. При непрерывной киносъемке изображение в видоискателе должно быть немерцающим.

Система такого оптического видоискателя основана на расщеплении пучка световых лучей, выходящих из окуляра или проектива микроскопа, на две части, одна из которых направляется к кинопленке, а другая — в сторону видоискателя.

На рис. 5-3 изображены две схемы оптического видоискателя. В первом из них светорасщепительный кубик разделяет пучок параллельных лучей, а второй — пучок сходящихся лучей.

Освещение объектов под микроскопом. Наблюдение и съемка через световой микроскоп может производиться при освещении объекта как проходящим, так и отраженным светом.

Когда свет от источника, сформированный осветительной оптической системой, направляется прямо в объектив микроскопа, просвечивая на своем пути препарат (объект), или падает на объект отвесно от объектива, то фон будет светлым, а объекты видны настолько, насколько они отличаются по своей оптической плотности или светорассеянию от фона. Такое освещение называют освещением по методу светлого поля.

Когда же световые лучи направлены на объект (препарат) под большими углами так, что они не могут прямо попасть в объектив, а лишь после отражения от частиц препарата, то фон окажется темным, а отразившие свет частицы — светлыми. Это будет освещение по методу темного поля.

Схемы освещения препарата для получения светлого или темного поля как в проходящем, так и падающем свете показаны на рис. 5-4.

В проходящем свете исследуются тонкие полупрозрачные срезы различных материалов, ткани, волокна животного, растительного происхождения и искусственные, гистологические препараты, культуры микроорганизмов, всевозможные жидкости со взвешенными в них частицами и многие другие объекты.

Получение равномерного и ярко освещенного поля осуществляется с помощью конденсора микроскопа. Так как точечный источник света большой яркости имеет малые размеры и приближение его к конденсору на близкое расстояние невозможно, то вместо самого источника света используют его изображение. Линза, необходимая

для получения такого изображения, называется коллектором; она является оптическим элементом осветительного фонаря.

Изображение источника света должно заполнять все отверстие диафрагмы конденсора, выполняющей роль апертурной диафрагмы микроскопа. Изменение апертуры производится с помощью ирисовой диафрагмы, жестко связанной с конденсором. Изображение диафрагмы конденсора является входным зрачком, а его изображение, образуемое объективом, — выходным зрачком микроскопа.

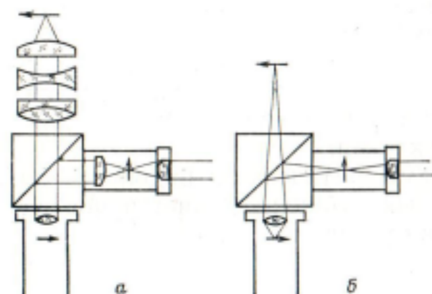


Рис. 5-3. Схемы оптических видоискателей светового микроскопа:
а — светорасщепительный кубик находится в пучке параллельных лучей; *б* — светорасщепительный кубик находится в сходящемся пучке световых лучей

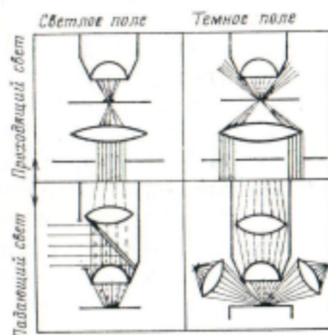


Рис. 5-4. Схемы освещения препарата

Апертура конденсора должна соответствовать апертуре объектива микроскопа, иначе конденсор будет диафрагмировать объектив микроскопа, не давая возможности использовать полностью его апертуру.

Конденсор можно установить так, чтобы он давал изображение источника света непосредственно на объекте. Этот способ получил название критического способа освещения. Однако чаще предпочтение отдают способу освещения по Кёллеру, который дает возможность наилучшим образом устранить рассеянный паразитный свет, сильно ухудшающий изображение. Схема освещения по способу Кёллера приведена на рис. 5-5.

Нить лампы *1* при помощи коллекторной линзы *2* проектируется на диафрагму *4* конденсора микроскопа, которая находится в его фокальной плоскости, так что свет направляется на объект в виде параллельных пучков. Перед коллекторной линзой имеется ирисовая диафрагма *3*, позволяющая изменять по желанию отверстие линзы. Расстояние от осветительного фонаря до микроскопа выбирается такое, чтобы конденсор *5* микроскопа давал на объект *6* изображение диафрагмы *3* коллекторной линзы. Тогда изображение этой диафрагмы в микроскопе *7* видно одновременно с объектом.

Отверстие коллекторной линзы регулируют так, чтобы объект был освещен только в той части, которая видна в поле микроскопа. Об-

ласти вне поля изображения должны быть неосвещенными, чтобы не создавать рассеянного света, который сильно снижает контраст изображения.

На рисунке показаны лучи, исходящие только из одной точки источника света. В действительности же источник света имеет некоторые размеры, и каждой его точке соответствует пучок лучей, аналогичный изображенному на рисунке, но более или менее наклоненный. В результате через каждую точку объекта проходит бесконечное число лучей света разного наклона, и все это происходит таким

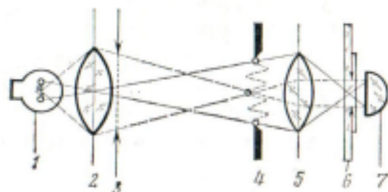


Рис. 5-5. Схема освещения по способу Кёллера


Рис. 5-6. Конденсор темного поля

же образом, как при критическом способе освещения, однако с тем важным преимуществом, на которое было указано выше.

Для повышения контраста изображения некоторых биологических объектов, таких, как живые бактерии и другие подобные микроорганизмы, применяется освещение наклонно падающими лучами света. Этот прием получил название способа косого освещения. Поле изображения освещается с одной стороны сильнее, с другой — слабее. Но появление теней от мелких частиц и контурного абриса более плотных элементов структуры способствует созданию рельефного изображения, которое может оказаться добавочным средством выявления формы микрообъектов.

Косое освещение осуществляется следующим образом. Конденсор поднимают до уровня предметного столика микроскопа и наносят на его фронтальную линзу каплю иммерсионного масла. Боковым движением, во избежание образования пузырьков воздуха, накладывают объект, заключенный между предметным и покровным стеклами, как бы размазывая масло по поверхности линзы конденсора. Произведя фокусировку изображения, открывают диафрагму коллектора до максимума и освещают объект прямым проходящим светом. Затем переводят диафрагму конденсора в сторону, пока бóльшая часть поля не потемнеет. Тогда, изменяя положение зеркала микроскопа, добиваются выравнивания освещенности. Повторяя эту операцию несколько раз, все больше эксцентрируют диафрагму. В результате получается некоторая неравномерность освещенности изображения, но она оправдывается преимуществом косого освещения.

Поворотом диафрагмы конденсора вокруг оптической оси микроскопа можно создать освещение наклонно падающими лучами с любой стороны. Объектив микроскопа при этом способе освещения должен иметь большую апертуру.

Всестороннее боковое освещение для получения темного поля осуществляется с помощью специального конденсора темного поля (рис. 5-6). Центральная часть этого конденсора закрыта непрозрачным диском, расположенным у входной линзы, поэтому в конденсор проходят только краевые лучи, образующие полый конус с вершиной в плоскости препарата. Выходящие из конденсора световые лучи направляются на объект под большими углами, так что они минуют фронтальную линзу объектива микроскопа.

Темнопольным освещением пользуются для получения изображения очень мелких объектов при сильных увеличениях, приближающихся к пределу разрешения микроскопа, в тех случаях, когда приходится удовлетвориться лишь приближенным определением формы микроскопических частиц и характером их движения.

Освещение падающим светом применяется при наблюдении и съемке непрозрачных объектов, таких, как, например, поверхности металлов (шлифы), петрографические образцы, текстили, поверхности бумаги и кожи, а также других материалов.

Для освещения объектов падающим светом при небольших увеличениях пользуются миниатюрными осветительными приборчиками, прикрепляемыми к нижней части тубуса микроскопа. При средних и больших увеличениях применяют осветительное устройство, называемое опак-иллюминатором (рис. 5-7).

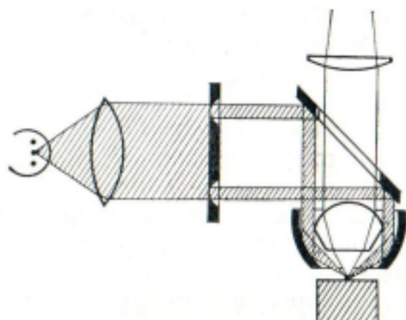


Рис. 5-7. Опак-иллюминатор

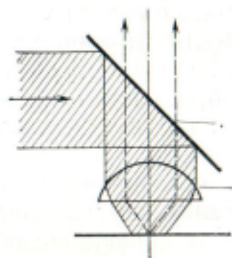


Рис. 5-8. Освещение объекта отвесно падающим светом через объектив

Когда необходимо, чтобы свет падал на объект прямо от объектива, освещение производится через объектив (рис. 5-8). При освещении отвесно падающими лучами через объектив объект представляется ярко освещенным в плоских частях перпендикулярных оптической оси объектива, таких, как поверхности граней кристаллических

кой структуры, всевозможные чешуйки и т. п. Наоборот, неровные участки оказываются более темными.

Для освещения наклонно падающими лучами применяется кольцевой или косой осветитель (рис. 5-9). Кольцевой осветитель представляет собой вогнутое зеркало с отверстием для объектива, он фокусирует световые лучи на объекте со всех сторон сверху. Косой осветитель имеет стеклянное тело с двумя посеребрянными отражающими поверхностями: плоской и вогнутой.

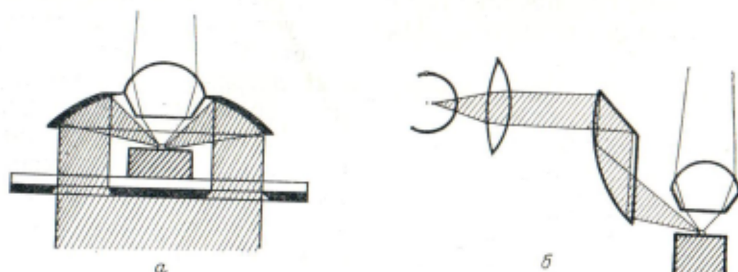


Рис. 5-9. Кольцевой (*а*) и косой (*б*) осветители

При освещении объекта наклонно падающим светом темными будут гладкие поверхности, а светлыми — участки возвышений и углублений.

Источники света для микрокиносъемки. Источники света для киносъемки через световой микроскоп должны прежде всего удовлетворять основному требованию — быть пригодными к использованию в осветительной системе по схеме Кёллера. Для этого излучающая поверхность должна быть компактной и весьма яркой. Этому условию в наибольшей мере удовлетворяют кинопроекционные лампы накаливания, ксеноновые и ртутные лампы высокого давления, а также точечные импульсные лампы, искровые разрядники и лазеры.

Лампы накаливания. Применяемые при визуальном наблюдении через микроскоп низковольтные лампы накаливания мощностью 15—25 *Вт* могут быть использованы при покадровой (цейтраферной) микрокиносъемке. Для киносъемки с нормальной частотой 24 *кадр/с* и скоростной киносъемки с частотой 100—150 *кадр/с* необходимы более мощные источники света. Наиболее часто используются кинопроекционные лампы накаливания различной мощности от 100 до 750 *Вт*.

Лампы накаливания имеют существенный недостаток — в их излучении содержится значительная доля тепловой радиации, вызывающей недопустимый нагрев препарата. Для преодоления этого недостатка применяют теплопоглощающие светофильтры. Для отвода тепла от осветительного фонаря в его конструкции предусматривается вентиляция или корпус фонаря изготовляют из материала, пропускающего тепловые лучи.

Ксеноновые кинопроекционные лампы имеют преимущество перед лампами накаливания ввиду их высокой яркости, близкого к дневному свету спектрального состава излучения и меньшего выделения тепловых лучей. Ксеноновые лампы можно использовать в импульсном режиме, что увеличивает их преимущества.

Импульсные точечные лампы как источник освещения при микрокиносъемке удобны тем, что, обладая высокой яркостью и излучая холодный белый свет, дают возможность получать очень короткие экспозиции, обеспечивая тем самым лучшую резкость изображения движущихся объектов. Однако усложняется конструкция осветительного фонаря, в который должна быть вмонтирована небольшая лампа накаливания (пилот-лампа), создающая освещение, необходимое при настройке микроскопа, установке кадра, фокусировке изображения и наблюдении за объектом в течение всего периода съемки. Схема осветительного устройства с пилот-лампой показана на рис. 5-10.

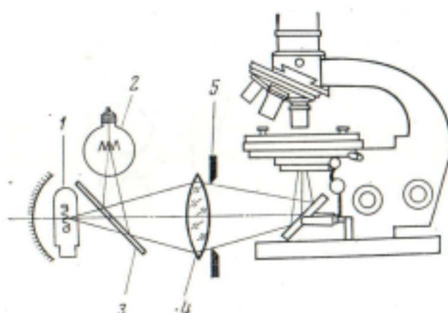


Рис. 5-10. Схема осветительного устройства с пилот-лампой:
1 — основная лампа; *2* — пилот-лампа; *3* — полупрозрачное зеркало; *4* — конденсор осветительного фонаря; *5* — диафрагма осветительного фонаря

Управление вспышками импульсной лампы производится с помощью электрической схемы с датчиком на механизме киносъемочного аппарата.

Искровые источники света, обладающие высокой яркостью, дают возможность осуществлять чрезвычайно короткие экспозиции и производить высокоскоростную киносъемку.

Оптические квантовые генераторы (лазеры) могут быть применены в качестве источника света при микрокиносъемке с чрезвычайно короткими экспозициями. Лазер излучает почти параллельный световой пучок, диаметр которого может быть меньше 0,1 *мм*. Средняя мощность световой энергии на единицу площади в фокусе системы может достигать $5 \cdot 10^6$ *Вт/см²*, в то время как при фокусировании солнечного света с помощью светосильного объектива с относительным отверстием 1:1 средняя мощность не превышает 500 *Вт/см²*, что на четыре порядка меньше.

Получение управляемых вспышек лазера осуществляется с помощью специальных схем.

Экспонометрия при киносъемке через световой микроскоп. Факторами, определяющими правильную экспозицию при киносъемке через световой микроскоп, являются:

1) яркость и спектральная характеристика источника света;

2) способ микроскопического исследования (фазовоконтрастный, поляризационный, люминесцентный);

3) способ освещения объекта;
4) численная апертура объектива и тип объектива;
5) численная апертура и тип конденсора;
6) фокусное расстояние и тип окуляра (или проектива);
7) оптическая длина камеры;
8) потери света во всех элементах оптической системы;
9) установка апертурных диафрагм;
10) плотность, цветность и контраст объекта (препарата);
11) светочувствительность и тип кинопленки;
12) кратность используемых светофильтров.

Ввиду большого числа переменных факторов расчет правильной экспозиции по таблицам невозможен.

В табл. 5-1 приведены ориентировочные данные, дающие представление об освещенностях изображения, получаемых на пленке в киносъемочном аппарате, соединенном с микроскопом для визуального наблюдения.

Таблица 5-1

Вид освещения или метод исследования	Освещенность изображения (*лк*)	
	минимальная	максимальная
Светлое поле	0,4	44
Фазовый контраст	0,2	3,5
Поляризованный свет	0,02	44
Люминесцентный свет . . .	0,08	2

Здесь важно обратить внимание не только на абсолютные значения освещенностей, но также на разброс освещенностей.

В этих условиях наиболее точным способом определения правильной экспозиции является способ пробных съемок, который оказывается целесообразным еще и потому, что позволяет не только определить правильную экспозицию, но также проверить резкость изображения и уточнить композицию кадра. По пробным негативам или обращенным позитивам можно судить о правильности выбранного режима проявления кинопленки.

Объективный способ замера освещенности изображения, образуемого световым микроскопом, стал возможен сравнительно недавно, когда появились высокочувствительные сернисто-кадмиевые и силиконовые фоторезисторы. Для определения правильной экспозиции необходимо измерять свет, прошедший через всю оптическую систему микроскопа. Это производится либо через трубку оптического видоискателя, когда окуляр видоискателя удален, либо с помощью устройства, схематически изображенного на рис. 5-11.

Работа с фотоэлектрическим устройством начинается с экспонирования серии пробных кадров с последовательно уменьшающимися выдержками для получения «экспозиционного клина».

После выбора наиболее правильно экспонированного кадра негатива находят по произведенным при съемке «клина» записям показания гальванометра, соответствующие этому лучшему кадру, и составляют график, которым и руководствуются при съемке.

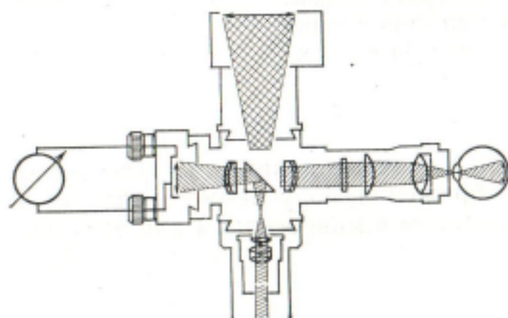


Рис. 5-11. Схема фотоэлектрического экспонометра, вмонтированного в микроскоп

Настроенный таким образом фотоэлектрический прибор показывает правильную экспозицию при микрокиносъемке объектов одного вида при одном и том же методе микроскопического исследования (фазовоконтрастный, поляризационный, люминесцентный и др.).

С изменением способа освещения или метода микроскопического исследования необходимо выполнить новую серию пробных съемок, чтобы произвести «привязку» фотоэлектрического прибора к новым условиям.

Электронный микроскоп. Повышения разрешающей силы микроскопа почти в сто раз удалось достичь в 30-х годах нашего столетия с помощью электронных лучей и электронной оптики.

Прогрессу в этом направлении послужили два научных открытия. Во-первых, волновой механикой установлено, что быстро движущимся электронам соответствует колебательный процесс с длиной волны $\lambda = \frac{h}{M_v}$, где h — постоянная Планка, а M_v — масса электрона, движущегося со скоростью v. Во-вторых, было установлено, что быстро движущиеся в пустоте прямолинейно электроны (электронные лучи) можно отклонять от первоначального направления с помощью электростатических или магнитных полей.

Если эти поля оформляются ротационно-симметрически, то электроны, вылетающие из точки вблизи оси, можно опять собрать в одну точку, как это происходит в световой оптике со стеклянными линзами.

При ускоряющем напряжении 50 *кВ* электроны достигают скорости около 120 000 *км/с*, а длина волны при этом становится равной 0,05 Å (ангстрема), то есть в 100 000 раз меньше длины волны зеленого света.

Теоретически при численной апертуре, равной 1,0, движущиеся электроны с длиной волны 0,05 Å могли бы дать разрешение 0,025 Å. Однако электростатическим и магнитным «линзам» свойст-

венны все виды аберраций, которые при больших апертурных углах очень велики. Поэтому в электронном микроскопе используются апертуры порядка 0,02—0,001, в 100—1000 раз меньшие, чем в световом микроскопе.

Практическая предельная разрешающая сила современного электронного микроскопа достигает лишь 100 000 крат, позволяя наблюдать частицы величиной 2 Å.

Ввиду того что электроны очень сильно поглощаются молекулами воздуха, его необходимо удалить с пути прохождения электронов. Электронный микроскоп помещается в трубу, из которой воздух непрерывно откачивается. Остаточное давление внутри прибора составляет всего около 10^{-4} *мм* рт. ст.

Принцип действия электронного микроскопа аналогичен микроскопу световому (рис. 5-12). Источником электронов служит нагреваемая электрическим током вольфрамовая нить. Электроны, покинувшие нить, приобретают большую скорость под воздействием анодного напряжения 30—50 *кВ*. В центре анода имеется небольшое отверстие, через которое пролетают электроны, используемые для образования изображения. Эта часть электронного микроскопа, являющаяся источником летящих с большой скоростью электронов, называется электронной пушкой.

Вылетевшие из пушки *1* электроны *2* попадают в магнитное поле первой электромагнитной линзы *3*, которая собирает их на исследуемом объекте *4*. На объекте электроны частично рассеиваются, в зависимости от толщины и плотности вещества. Вторая электромагнитная линза *5* фокусирует электронные пучки в плоскости *6*, образуя электронное изображение. В образовании этого изображения участвуют лишь те электроны, которые при прохождении через объект *4* отклонились вследствие рассеяния на сравнительно малые углы. Электроны, отклонившиеся на бóльшие углы, задерживаются апертурной диафрагмой, находящейся в электромагнитной линзе *5*. Эта диафрагма имеет диаметр около 0,03 *мм*.

Далее электроны попадают в магнитное поле третьей электромагнитной линзы *7*, которая фокусирует окончательное электронное изображение *8* на флуоресцирующем экране *9* или фотопластинке *10*.

Таким образом, первая электромагнитная линза является конденсором, вторая — объективом, а третья — проективом.

В основании колонки электронного микроскопа имеется окно *11*, через которое ведется наблюдение окончательного увеличенного изображения объекта на флуоресцирующем экране.

Участки исследуемого объекта, не рассеивающие электронные лучи, получаются на флуоресцирующем экране светлыми, а темными получаются те, которые рассеивают электроны.

Киносъемка на электронном микроскопе возможна двумя способами: 1) съемкой флуоресцирующего изображения с люминофорного экрана и 2) экспонированием кинопленки в вакууме непосредственно быстро летящими электронами.

Киносъемка изображения с флуоресцирующего экрана производится обычным киносъемочным аппаратом (рис. 5-13). Этот способ дает худшую резкость вследствие зернистой структуры люминофора и влияния стекла, через которое ведется съемка. Кроме того, необходима большая интенсивность потока электронов, чтобы вызвать достаточное для киносъемки свечение экрана.

Способ экспонирования кинопленки в вакууме непосредственно электронами обеспечивает лучшую резкость изображения и требует значительно меньшей интенсивности электронных лучей. Последнее важно для предотвращения повреждения или полного разрушения исследуемого объекта.

Для выполнения киносъемки в вакууме необходим специальный киноаппарат, который вставляется в электронный микроскоп взамен магазинной кассеты для фотопластинок.

Киноаппарат для съемки на электронном микроскопе в вакууме имеет лентопротяжный механизм с зубчатыми барабанами и грейфером, обтюратор и кассеты для кинопленки. На рис. 5-14 показан 16-*мм* киноаппарат для съемки в вакууме на электронном микроскопе «Ельмископ 1А» фирмы «Сименс» (ФРГ). На рис. 5-15 изображена схема киноаппарата для съемки в вакууме на 35-*мм* кинопленку фирмы «Бальцерс» (ФРГ). Оригинальная конструкция этого компактного киноаппарата позволяет использовать его на многих моделях электронного микроскопа.

Кинопленка для съемки в вакууме на электронном микроскопе кроме высокой чувствительности к электронным лучам, мелкозернистости и высокого контраста должна обладать еще двумя важными свойствами: 1) иметь защиту от образования на ней зарядов статического электричества и 2) минимальным содержанием влаги и других испаряющихся веществ.

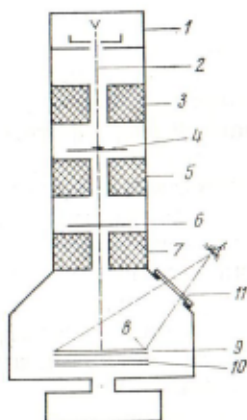


Рис. 5-12. Схема электронного микроскопа

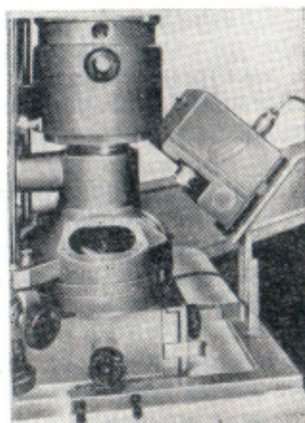


Рис. 5-13. Киносъемка изображения с флуоресцирующего экрана электронного микроскопа

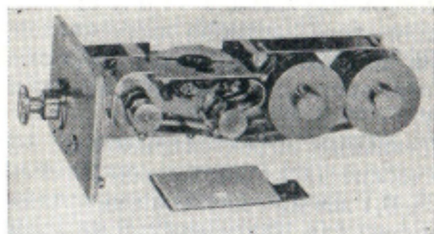


Рис. 5-14. Киноаппарат для съемки на электронном микроскопе в вакууме

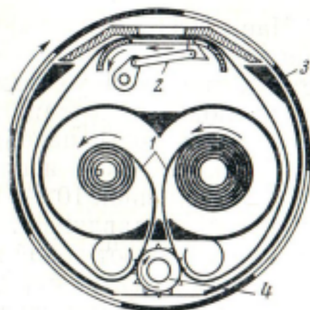


Рис. 5-15. Схема киноаппарата для съемки в вакууме:
1 — кинопленка; 2 — грейфер; 3 — цилиндрический обтюратор; 4 — зубчатый барабан

При бомбардировке кинопленки электронами в вакууме на ее поверхности скапливаются заряды статического электричества. При прерывистом продергивании кинопленки грейфером возникают искровые разряды, оставляющие след на изображении и портящие его. Для предотвращения электрических разрядов кинопленка должна иметь проводящее покрытие.

Требование минимального содержания влаги и других испаряющихся веществ в кинопленке, главным образом в ее основе, вызывается тем, что вследствие быстрого испарения летучих веществ в вакууме основа кинопленки становится чрезвычайно хрупкой. Поэтому для киносъемки в вакууме применяют кинопленку на неусыхающей полистироловой основе.

Подготовка объектов для исследования с помощью электронного микроскопа. Объекты, исследуемые с помощью киносъемки на электронном микроскопе, находятся в вакууме. Естественно поэтому, что невозможно таким образом изучать процессы, происходящие в живых микроорганизмах. Однако многие другие процессы могут происходить в вакууме, как, например, изменения в неживых объектах при нагревании, плавлении, химических реакциях и т. п., могущие иметь важное значение для науки.

Имеются четыре основных способа подготовки объекта для исследования с помощью электронного микроскопа:

1) объект лежит на сетке или диафрагме; так делают при исследовании волокон, тонких пленок и т. п.;

2) объект прилип к краям диафрагмы (волокна, мелкие частицы, дымы);

3) объект включен в пленку (мелкие частицы);

4) объект лежит на пленке-подложке.

Ввиду большого поглощения электронов материей толщина объектов не должна превышать 0,1 *мкм*, хотя отдельные элементы объекта могут иметь толщину в несколько микронов.

Чаще всего применяется способ нанесения образцов на тонкие однородные органические пленки, которые выполняют роль предметных стекол. Исходным материалом служит 0,5—1,5%-ный раствор коллодия в амилацетате. Капля этого раствора выпускается на поверхность воды, находящейся в широком сосуде с невысокими стенками, где после испарения амилацетата остается тончайшая пленка (толщиной 10^{-5}—10^{-6} *мм*).

Пленку выдавливают на специальные объектодержатели, которые представляют собой металлические диски диаметром 2—4 *мм* с отверстием в центре порядка 0,05—0,1 *мм* или диски из металлической сетки с большим числом отверстий (до 100 отверстий на 1 $мм^2$). Коллоидные пленки не дают заметной собственной структуры и обладают весьма малым поглощением электронов. Кроме коллоидных пленок для тех же целей применяют кварцевые пленки и пленки из окиси алюминия, которые обладают хорошей термостойкостью.

Исследуемые объекты наносятся на пленки чаще всего осаждением из раствора или взвеси. Для этого каплю раствора или взвеси наносят на пленку с помощью проволочной петельки. После испарения жидкости на пленке осаждается тончайший слой вещества, подлежащего исследованию. Возможно нанесение объектов также путем напыления или улавливания частиц дыма, образующегося при сгорании вещества. Тонкие металлические слои наносят и методом катодного распыления или испарения в вакууме.

При изучении структуры поверхности применяют способ слепков, называемых репликами, воспроизводящих рельеф поверхности с большой точностью. Эти реплики делают настолько тонкими, что их исследуют в проходящих электронных лучах.

Наиболее просто приготовляются органические реплики. Для их получения исследуемый образец погружают в 0,5%-ный раствор коллодия в амилацетате или 0,5%-ный раствор поливинила в диоксане, затем тщательно высушивают. Далее образец с образовавшейся на нем пленкой погружают в воду, где пленка отделяется. Для тех же целей используют также некоторые окисные пленки металлов, если они сами по себе бесструктурны и отделение их от металла возможно. Так исследуется структура алюминия и его сплавов, никеля и некоторых других металлов.

Существуют более сложные способы приготовления препаратов для исследования на электронном микроскопе. Ни один из способов не является универсальным. Выбор способа подготовки объекта определяется особенностями каждого исследования.

Растровый электронный микроскоп. В растровом электронном микроскопе тончайший пучок электронных лучей сканирует объект, последовательно пробегая по нему так же, как он пробегает по мозаике в телевизионной передающей трубке.

При ударении электронов по материальному объекту в вакууме часть электронов отражается, другая же часть поглощается, но это поглощение вызывает выход вторичных электронов или выделение рентгеновской радиации и флуоресценции.

Если вблизи предмета, который подвергается бомбардировке электронами в вакууме, установить положительно заряженный коллектор (собиратель электронов), соединенный с видеоусилителем телевизионной системы, то на экране электронно-лучевой трубки (кинескопа) будет получено изображение сканируемого электронным лучом предмета.

Схема устройства растрового электронного микроскопа изображена на рис. 5-16. Электронная пушка *1* испускает через маленькое отверстие в центре анода пучок быстро летящих электронов. Электромагнитные линзы *2, 3* и *4* формируют электроны в тончайший пучок. Проходя между отклоняющими катушками *5*, пучок электронов сканирует объект *6*. Коллектор *7* собирает вторичные или отраженные электроны. Электрические изменения в цепи коллектора поступают в усилитель видеосигналов *8* и далее в управляющие сетки электронно-лучевых трубок *9* и *10*. Управление сканированием осуществляется схемой, смонтированной в блоке *11*, а регулирование амплитуды луча, сканирующего объект, производится схемой блока *12*. Анодное напряжение в электронной пушке регулируется в блоке *14* в пределах от 1 до 50 *кВ*. Вакуум внутри корпуса растрового электронного микроскопа поддерживается системой *15*. Питание электромагнитных линз осуществляется от блоков *13*.

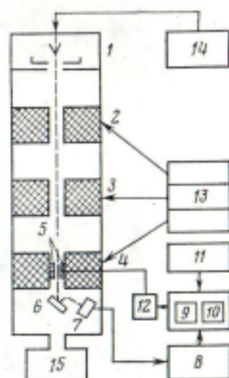


Рис. 5-16. Схема устройства электронного микроскопа

Изображение исследуемого объекта воспроизводится на экранах двух электронно-лучевых трубок. Один экран предназначается для визуального наблюдения увеличенного изображения объекта; он покрыт люминофором Р7, флуоресцирующим голубовато-желтым светом с длительным послесвечением. Частота смены кадров на экране для наблюдения регулируется в пределах от 10 *кадр/с* до 5 *кадр/мин*.

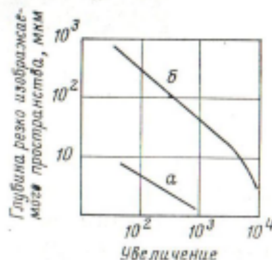


Рис. 5-17. Сравнение глубины резко изображаемого пространства, получаемого в световом микроскопе (*а*) и растровом электронном микроскопе (*б*)

Другой экран флуоресцирует голубым светом с коротким послесвечением (люминофор Р11). Он служит для фотографирования изображения. Развертка одного кадра на экране для съемки длится в течение времени от 2 *с* до 3—4 *мин*. Разрешающая способность этого экрана в два раза более высокая.

С помощью дополнительного устройства можно воспроизводить изображение на нормальном телевизионном экране.

Растровый электронный микроскоп дает возможность получать увеличения от 20 до 200 000 крат с разрешением около 150 Å (10^{-7} *мм*).






Рис. 5-18. Снимки, полученные на электронном микроскопе. Дрозофила

Важной особенностью растрового электронного микроскопа является весьма большая глубина резко изображаемого пространства, превышающая почти в 500 раз глубину резко изображаемого пространства, которую можно получить на световом микроскопе (рис. 5-17). Изображения, полученные на растровом электронном микроскопе, создают впечатление объемности микроструктуры исследуемых объектов (рис. 5-18).

Киносъемка на растровом электронном микроскопе. Фотографирование и киносъемка изображения, получаемого с помощью растрового электронного микроскопа, производится с экрана электронно-лучевой трубки, покрытого люминофором P11, имеющим голубоватый цвет свечения и короткое время послесвечения. Экран этот имеет небольшие размеры (обычно 100×100 *мм*).

Развертка на экране изображения одного кадра, состоящего из 1000 линий, происходит весьма медленно. Самое короткое время

развертки одного кадра составляет около 2 *с*. Следовательно, возможна только замедленная съемка.

Электронная система формирования изображения дает возможность изменять в широких пределах контраст, а также получать на экране позитивное или негативное изображение.

Против экрана растрового электронного микроскопа можно установить киноаппарат для покадровой съемки (типа РФК), синхронизировав его работу с системой развертки изображений на экране.

Можно использовать дополнительное приспособление, позволяющее воспроизвести изображение на нормальном телевизионном экране со стандартной разверткой 625 строк и произвести видеозапись на магнитную ленту. Материал магнитной видеозаписи можно затем перевести на кинопленку.

Этот способ позволяет получить картину изменений в микроструктуре изучаемого объекта, происходящие при растяжении, изгибе, кручении или нагреве.

Для получения кинофильма можно воспользоваться фотоаппаратом, имеющимся на каждом растровом электронном микроскопе, и снять последовательную серию фотокадров, которые затем репродуцировать на кинопленку. Таким же способом можно получить эффект «наезда», то есть постепенное увеличение изображения объекта.

Подготовка объекта для съемки на растровом электронном микроскопе. Для исследования и съемки объектов, содержащих влагу или другие испаряющиеся вещества, необходима предварительная сушка их в вакууме. При низком напряжении (до 1000 *В*) другой обработки объекта не требуется.

При рабочих напряжениях от 1 до 3 *кВ* можно исследовать без особой подготовки такие поверхностные явления, как химическая адсорбция и окисление.

При более высоких напряжениях диэлектрические объекты необходимо покрывать тонкой электропроводящей пленкой, которую наносят путем напыления из газовой фазы одноатомного слоя смеси золота и палладия или других металлов. Это нужно для того, чтобы уменьшить накапливание заряда статического электричества на непроводящих объектах.

Глава 6

КИНОСЪЕМКА В ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧАХ

Инфракрасные лучи — невидимые, они не воспринимаются человеческим глазом. Обнаружить их присутствие и действие можно лишь различными косвенными способами. Ближние инфракрасные лучи, прилегающие к длинноволновому концу видимой части спектра, могут быть зарегистрированы фотографическим способом. Инфракрасная фотография используется начиная с 1925 года, когда были получены сенсибилизаторы, очувствляющие фотографическую эмульсию к инфракрасной области спектра.

Инфракрасная область лежит за пределами красной части видимого спектра начиная с $\lambda=760$ *нм* (темно-красная линия калия) и распространяется далее в сторону увеличивающихся длин волн. Область от $\lambda=760$ *нм* до $\lambda=3500$ *нм* является областью практических применений инфракрасной радиации.

Исходя из теории фотохимических реакций, можно предположить, что фотография в инфракрасных лучах, основанная на сенсибилизации фотографических материалов, вряд ли осуществима в лучах с длиной волны более 2000 *нм*.

Существуют также способы получения изображения в инфракрасных лучах с помощью электронно-оптических преобразователей и способы, основанные на свойствах инфракрасных лучей гасить фосфоресценцию, девуалировать фотографический слой и оказывать тепловое действие.

Ценность фотографического способа фиксации изображения, образованного инфракрасными лучами, заключается в некоторых свойствах инфракрасной радиации.

1. Инфракрасные лучи менее подвержены рассеянию в атмосфере, как и вообще в мутных средах. Они лучше проходят сквозь воздушную дымку и легкий туман по сравнению с лучами видимого света. Это дает возможность производить съемку объектов, находящихся на большом удалении (рис. 6-1), преодолевая воздушную дымку.

2. Поглощение и отражение инфракрасных лучей иное, чем лучей видимой области спектра. Поэтому многие объекты, кажущиеся по окраске и яркости одинаковыми в видимом свете, на фотографическом снимке, полученном в инфракрасных лучах, отличаются со-



Рис. 6-1. Левый снимок получен на обычной панхроматической пленке без светофильтра; правый снимок — на инфрахроматической пленке с инфракрасным светофильтром

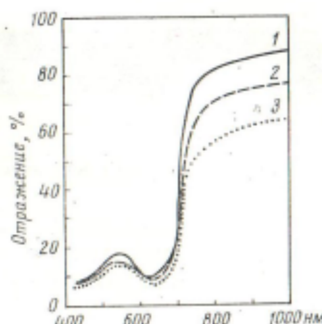


Рис. 6-2. Кривые спектрального отражения живой зелени травы и деревьев:
1 — трава; 2 — лиственный лес; 3 — хвойный лес

вершенно другим распределением тонов. Это позволяет обнаружить много интересных и важных особенностей снятого объекта. Например, хлорофилл, содержащийся в живой зелени листвы и травы, сильно поглощает коротковолновые видимые лучи и отражает большую часть инфракрасных лучей. Кроме того, поглощая ультрафиолетовые лучи, хлорофилл флуоресцирует в инфракрасной области. Вследствие этого на фотографиях, сделанных на инфрахроматической пленке с применением красного светофильтра, зелень выходит неестественно белой, а голубое небо — темным (рис. 6-2). Многие краски, кажущиеся на глаз очень яркими, из-за почти полного поглощения ими инфракрасных лучей получаются на инфрахроматической пленке почти черными.

3. Инфракрасные лучи способны проникать через непрозрачные для видимого света среды. Кожа человека, тонкие слои дерева, эбонита, темные оболочки насекомых и растений и др. прозрачны для инфракрасных лучей. На рис. 6-3 приведены некоторые примеры съемки таких объектов в инфракрасных лучах (*б*) и в видимом свете (*а*).

Кровеносные сосуды хорошо видны через кожу, которая прозрачна для инфракрасных лучей. Роговая обо-



Рис. 6-3. Примеры съемки различных объектов в видимых и инфракрасных лучах



Рис. 6-4. Спектрограмма инфрахроматической пленки

лочка головы мучного червя могла быть обесцвечена с помощью химических средств, но такая обработка не всегда безвредна для биологического объекта. Съемка в инфракрасных лучах устраняет необходимость химической обработки объекта. Пигментная краска темных очков оказывается прозрачной для инфракрасных лучей.

4. Поскольку инфракрасные лучи невидимые, то съемка при освещении только инфракрасным светом, по существу, является съемкой в темноте. Такая фото- или киносъемка бывает необходима в случаях, требующих темновой адаптации глаз, а также при всевозможных психологических исследованиях.

В настоящее время киносъемка в инфракрасных лучах применяется как в научной кинематографии, так и в производстве кинофильмов для решения некоторых изобразительных задач, для съемки «днем под ночь» и др.

Инфрахроматические кинопленки. Фотографирование в инфракрасных лучах стало возможным благодаря оптическим сенсибилизаторам, придающим чувствительность фотографическим материалам к инфракрасной области спектра. Оптические сенсибилизаторы вводятся в эмульсионный слой при изготовлении самой эмульсии или при последующей обработке фото- или кинопленки путем купания в растворе сенсибилизатора. В настоящее время имеются оптические сенсибилизаторы, которые позволяют довести спектральную чувствительность фотографической эмульсии до $\lambda = 1300$ *нм*.

Характерной особенностью инфрахроматических пленок является провал чувствительности в средней части видимого спектра, особенно к зеленому цвету (рис. 6-4).

Для широкого использования в производстве художественных, научно-популярных, учебных и документальных кинофильмов отечественной промышленностью изготовляется инфрахроматическая кинопленка «Кино-инфра», максимум светочувствительности которой приходится против $\lambda = 760$ *нм*. На кинопленке «Кино-инфра» получают ночной эффект при съемке днем; ее светочувствительность достаточна для киносъемки с красным светофильтром КС-14 при диафрагме 1:4—1:5,6.

Для научно-исследовательских съемок изготовляются инфрахроматические кинопленки И-810, И-920, И-1030 и И-1070. Характеристики этих пленок приведены в табл. 6-1.

Инфрахроматические кинопленки не стабильны; они не могут храниться длительное время. Обычная упаковка пригодна только для пленок, чувствительность которых в области инфракрасного спектра простирается недалеко, как, например, «Кино-инфра». Другие инфрахроматические кинопленки хранят в запаянных ампулах.

Таблица 6-1

Фотографические характеристики инфрахроматических кинопленок для научных целей

Тип кинопленки	Светочувствительность, $S_{0,85}$	Контраст, γ	Вуаль, D_0	Фотографическая широта, L	Разрешающая способность R, *лин/мм*	Пределы сенсибилизации, *нм*
И-810	200	1,5	0,25	0,6	60	650—850
И-920	50	1,5	0,25	0,6	60	700—1000
И-1030	0,5	1,5	0,25	0,6	60	800—1100
И-1070	0,5	1,5	0,3	0,6	60	900—1150

Очувствление кинопленки к инфракрасным лучам, как уже говорилось выше, может быть произведено купанием обычной негативной кинопленки средней светочувствительности в растворе сенсибилизатора (криптоцианин, неоцианин, тетракарбоцианин, пентакарбоцианин и др.). Так как кинопленки большинства сортов содержат в эмульсионном слое значительный избыток растворимых бромидов, то перед сенсибилизацией кинопленку следует промыть в дистиллированной воде в течение 4—5 *мин*. Подвергшаяся предварительной промывке перед сенсибилизацией кинопленка будет обладать более высокой чувствительностью к инфракрасным лучам, чем кинопленка, которая такой промывке не подвергалась.

Для повышения чувствительности инфрахроматических пленок применяют гиперсенсибилизацию. Наиболее простым способом гиперсенсибилизации является купание кинопленки в течение около 1 *мин* в 4%-ном растворе аммиака или в течение 30 *с* в этиловом спирте, после чего следует короткая промывка (10—15 *с*) в дистиллированной воде и быстрая сушка.

Скорость сушки в процессах сенсибилизации и гиперсенсибилизации к инфракрасным лучам играет весьма существенную роль. Пользование подогретым воздухом не рекомендуется. Нужно применять воздух с минимальной относительной влажностью.

Гиперсенсибилизация аммиаком дает возможность повысить светочувствительность кинопленки в 3—6 раз. Одновременно гиперсенсибилизация улучшает хроматическую чувствительность кинопленки, расширяя ее в сторону длинноволновой области спектра. После гиперсенсибилизации у большинства кинопленок возрастает коэффициент контрастности и увеличивается вуаль.

При работе с инфрахроматическими кинопленками можно пользоваться лабораторным освещением через темно-зеленый или желто-коричневый светофильтр, например ОРВО 144, кривая пропускания которого приведена на рис. 6-5. Рекомендуется также жидкий светофильтр, который составляется из девяти частей насыщенного раствора медного купороса и одной части 5%-ного раствора двухромовокислого калия. Раствор медного купороса задерживает красные и инфракрасные лучи, а двухромовокислый калий добавляется

для поглощения синих и фиолетовых лучей. Такой светофильтр при толщине слоя 7 *см* и обычной лампе накаливания 25 *Вт* дает достаточное освещение для работы, вместе с тем он является неактиничным для инфрахроматических фотоматериалов.

Источники инфракрасной радиации. Всякое нагретое до достаточно высокой температуры тело может служить источником инфракрасной радиации. Из всех доступных нам источников инфракрасной радиации наиболее мощным является солнце. На рис. 6-6 приведена кривая, показывающая спектральное распределение энергии излучения солнца, падающей на 1 *см*² горизонтальной поверхности

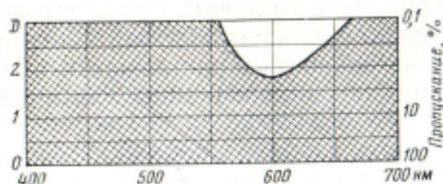


Рис. 6-5. Спектральное светопропускание лабораторного светофильтра ОРВО 144

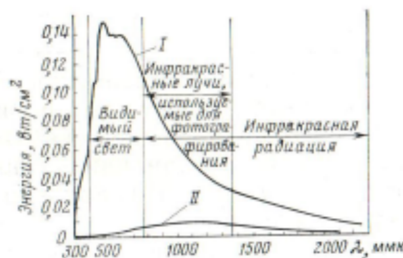


Рис. 6-6. Спектральное распределение энергии в спектре излучения солнца (кривая *I*) и излучение лампы накаливания 1000 *Вт* (кривая *II*)

при положении солнца в зените в безоблачный день. Для сравнения на том же рисунке дана кривая распределения энергии в спектре лампы накаливания мощностью 1000 *Вт*, находящейся на расстоянии 1 *м* от освещаемой поверхности.

Несмотря на то, что относительное распределение энергии в спектре солнца показывает максимум в желто-зеленой части, по своей абсолютной величине инфракрасная радиация, содержащаяся в излучении солнца, является вполне достаточной для нормальной киносъемки в инфракрасных лучах.

В качестве искусственных источников инфракрасной радиации при киносъемках в инфракрасных лучах используются главным образом такие температурные излучатели, как электрические вольфрамовые лампы накаливания, простая угольная электрическая дуга и угольная дуга высокой интенсивности.

Электрические вольфрамовые лампы накаливания дают максимум излучения в инфракрасной области спектра (рис. 6-7). Кривые спектрального распределения энергии в излучении простой угольной электрической дуги и электрической дуги высокой интенсивности также показывают, что эти источники весьма богаты инфракрасными лучами. Величина энергетической яркости электрической дуги высокой интенсивности в инфракрасной области почти совпадает с величиной энергетической яркости простой электриче-

ской угольной дуги. Высокоинтенсивная дуга как источник излучения в близкой инфракрасной области спектра никаких преимуществ перед простой электрической угольной дугой не имеет. Преимущество электрической дуги высокой интенсивности перед всеми другими температурными излучателями заключается лишь в том, что она является одним из самых мощных искусственных источников лучистой энергии.

Для освещения объектов при киносъемке в инфракрасных лучах могут применяться обычные осветительные приборы с металлическими отражателями. Как видно из рис. 6-8, лучшим отражением

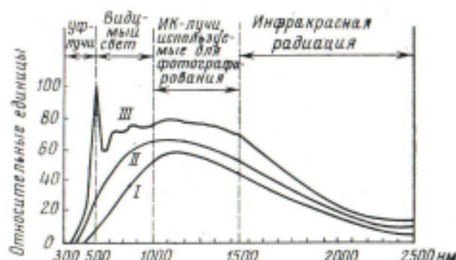


Рис. 6-7. Относительное спектральное распределение энергии искусственных источников температурного излучения:
I — лампа накаливания; *II* — простая угольная электрическая дуга; *III* — электрическая дуга высокой интенсивности

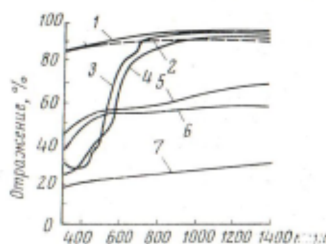


Рис. 6-8. Кривые отражения:
1 — серебро; *2* — алюминий; *3* — золото; *4* — медь; *5* — сталь; *6* — хром; *7* — уголь (графит)

инфракрасных лучей обладают металлы: серебро, золото, алюминий, медь; несколько хуже отражают инфракрасные лучи сталь и хром.

Светофильтры для выделения инфракрасных лучей. Так как фотографические материалы (кинопленки), сенсибилизированные к инфракрасным лучам, обладают чувствительностью также и к лучам коротковолновой части видимого спектра, то при киносъемке в инфракрасных лучах необходимо применять светофильтры, выделяющие только инфракрасные лучи и задерживающие остальные.

Светофильтры могут быть установлены на осветительные приборы либо перед объективом киносъемочного аппарата. При установке светофильтров на осветительных приборах объекты съемки будут находиться в «темноте», то есть они не будут видны, так как глаз человека не чувствителен к инфракрасным лучам. Если же светофильтр установлен перед объективом киносъемочного аппарата, объекты съемки будут освещены смешанным инфракрасным и видимым светом, и съемка будет производиться не в «темноте», а на свету. И в том и другом случае мы не сможем увидеть снимаемое изображение на матовом стекле киноаппарата. Таким образом, установка кадра и наводка изображения на фокус должны производиться при отсутствии светофильтра.

В качестве светофильтров, устанавливаемых на осветительные приборы, могут быть использованы не только цветные стекла, но также и некоторые другие материалы, хорошо пропускающие инфракрасные лучи, как, например, листовой эбонит (толщиной 0,3—0,6 *мм*), все породы дерева (толщиной до 3 *мм*) и некоторые сорта бумаги, за исключением черной бумаги, применяемой для упаковки фотографических материалов, которая не пропускает инфракрасных лучей. Могут применяться жидкие светофильтры в кюветах, например раствор марганцовокислого калия и др.

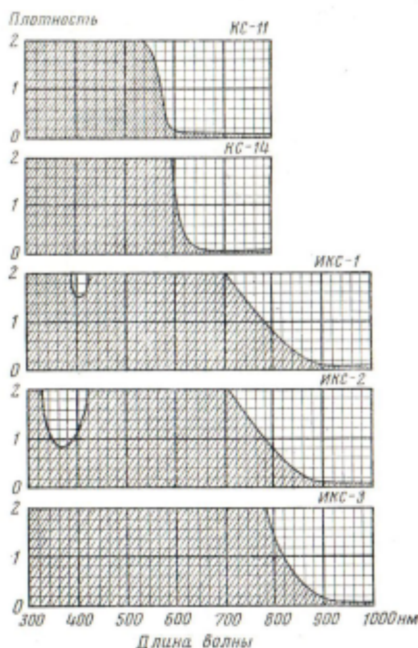


Рис. 6-9. Кривые спектрального пропускания окрашенных в массе красных и инфракрасных светофильтров отечественного производства

Светофильтры, предназначенные для установки перед объективом киносъемочного аппарата, должны отвечать строгим требованиям, предъявляемым к элементам оптических систем, чтобы не нарушить коррекцию объектива. Поверхности стекол должны быть строго параллельны, а в массе стекла не должно быть свилей и пузырьков.

При съемках на инфрахроматическую пленку часто применяют красные светофильтры, пропускающие не только инфракрасные, но и видимые красные лучи. Применение красных светофильтров оправдано тем, что инфрахроматические пленки чувствительны также и к красным лучам начиная с $\lambda=650$ *нм*. На рис. 6-9 приведены кривые пропускания окрашенных в массе красных и инфракрасных светофильтров отечественного производства.

Киносъемка в инфракрасных лучах может производиться любым киносъемочным аппаратом с установленным перед объективом красным или инфракрасным светофильтром.

Одна из главных особенностей киносъемки в инфракрасных лучах заключается в необычности фокусирования изображения. Так как инфракрасные лучи невидимые, то проверка резкости изображения объекта на матовом стекле киноаппарата невозможна. Если же, удалив инфракрасный светофильтр, сфокусировать изображение, образованное видимыми лучами света, а затем, снова установив на объектив светофильтр, произвести киносъемку в инфракрасных лучах, то полученное изображение будет нерезким. Это произойдет

потому, что для видимых световых лучей и инфракрасных лучей фокусное расстояние объектива не одно и то же.

Преломление световых лучей разных длин волн линзами объектива не одинаково: коротковолновые световые лучи преломляются сильнее, а длинноволновые — слабее. Это явление носит название хроматической аберрации.

При расчете объективов стремятся максимально уменьшить разницу фокусных расстояний для лучей различных длин волн путем подбора сортов стекла и радиусов кривизны линз. Однако даже для световых лучей видимой области спектра хроматическую коррекцию осуществить удается не полностью. Инфракрасные лучи не принимаются в расчет, так как они при обычных съемках в видимом свете не воздействуют на фотографический слой пленки.

Специальные объективы для съемки в инфракрасных лучах изготовляются из прозрачных кристаллов флюорита (CaF_2 — фторная соль кальция). Этот материал обладает очень малой дисперсией, что значительно упрощает конструкцию объектива, позволяя осуществить коррекцию также и для инфракрасных лучей.

Чтобы при съемке обычным объективом в инфракрасных лучах получить резкое изображение, необходимо вносить поправку на величину фокусной разницы. Эта поправка имеет всегда положительный знак и величина ее для большинства объективов составляет от 0,35 до 1% фокусного расстояния объектива.

Лучшим способом нахождения фокусной разницы следует признать способ пробных съемок и точной разметки дистанционной шкалы фокусирования объектива.

Зная величину необходимой поправки на фокусную разницу, целесообразно рассчитать и изготовить насадочную линзу, укорачивающую фокусное расстояние объектива на величину поправки. Такую насадочную линзу можно изготовить из цветного стекла, окрашенного в массе в нужный цвет, чтобы она одновременно служила и светофильтром для выделения инфракрасных лучей.

Фокусную разницу можно не учитывать, когда киносъемка производится короткофокусным объективом $f = 25$ *мм* или короче, с диафрагмой 1 : 8 и более.

Определение правильной экспозиции. Селеновые вентильные фотоэлементы и сернистокадмиевые фоторезисторы, применяемые в качестве светочувствительного датчика в обычных фотоэлектрических экспонометрах, малочувствительны к инфракрасным лучам.

Для измерения интенсивности инфракрасных лучей необходим фотоэлемент, чувствительный к инфракрасной радиации. Таким является сернистоталлиевый фотоэлемент вентильного типа. На рис. 6-10 приведены сравнительные кривые спектральной чувствительности различных фотоэлементов.

Недостатком сернистоталлиевого фотоэлемента является его большая зависимость от температуры. При работе с ним необходимо пользоваться графиком температурных поправок.

К инфракрасным лучам чувствительны также меднозакисный, сернистосеребряный, цезиевый и германиевый фотоэлементы. Однако все фотоэлементы, чувствительные к инфракрасным лучам, не используются в обычных фотоэлектрических экспонометрах. Поэтому определение правильной экспозиции производят путем пробных съемок.

Фотоэлектрические экспонометры с селеновым фотоэлементом или сернистокадмиевым фоторезистором могут дать лишь ориентировочные данные для определения правильной экспозиции при съемке в инфракрасных лучах. При измерениях нужно установить перед окном фотоэлемента темно-красный светофильтр. Путем пробных съемок необходимо отградуировать шкалу экспонометра, после чего им можно пользоваться для ориентировочного определения правильной экспозиции при киносъемке в инфракрасных лучах.

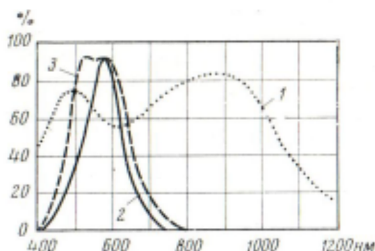


Рис. 6-10. Сравнительные кривые спектральной чувствительности фотоэлементов различных типов:
1 — сернистоталлиевый фотоэлемент; *2* — селеновый фотоэлемент; *3* — сернистокадмиевое фотосопротивление

Киносъемка «днем под ночь». Инфрахроматическую кинопленку применяют для киносъемки «днем под ночь», особенно когда нужно получить эффект лунной ночи. Общие планы пейзажей с черным небом, белой листвой деревьев и глубокими тенями получаются поразительно красивыми. Однако лица людей на крупных и средних планах могут оказаться излишне светлыми и неприятными, так как инфракрасные лучи способны проникать сквозь кожу и обнаруживать кровеносные сосуды. В этих случаях необходимо применять грим и производить пробные съемки. Одежда людей также может быть воспроизведена инфрахроматической кинопленкой совершенно иными тонами, чем на обычной кинопленке.

Необходимо учитывать, что при съемке в инфракрасных лучах небо получится черным, только когда оно голубое и безоблачное, а солнце находится спереди или сбоку от снимаемой сцены. При контражурном освещении, когда солнце освещает сцену сзади, небо получится светлым ввиду большого содержания рассеянных инфракрасных лучей в той части небосвода, где находится солнце.

Киносъемка в темноте. Инфракрасные лучи — невидимые. Съемка при освещении объектов только инфракрасными лучами (с длиной волны более 760 *нм*) практически производится в темноте.

Киносъемка в темноте бывает необходима при проведении некоторых биологических и медицинских экспериментов, требующих темновой адаптации глаз, а также при психологических опытах и криминалистических исследованиях. Этот метод используется также для съемок скрытой камерой, когда требуется фиксация реакции аудитории при каком-либо действии.

Так как вольфрамовые лампы накаливания излучают значительную часть энергии в инфракрасной области, они являются наиболее подходящими источниками инфракрасного освещения. Полностью исключить видимый свет, излучаемый лампами накаливания, и сделать невидимыми источники освещения можно, использовав темно-красные или инфракрасные светофильтры и направив осветительные приборы на потолок и на стены. Лампы целесообразно включить на пониженное напряжение, например соединив их последовательно по две лампы, чтобы уменьшить видимое излучение ламп накаливания.

Современные высокочувствительные инфрахроматические кинопленки, как, например, «Кодак Хай Спид Инфрарэд», дают возможность производить киносъемку с частотой 24 *кадр/с* при диафрагме 1 : 4, освещая объект съемки с расстояния 15 *м* лишь одной автомобильной фарой с лампой 30 *Вт*, закрытой темно-красным светофильтром Рэттен № 25 или № 29.

Киносъемка в инфракрасных лучах с применением ЭОП. Электронно-оптические преобразователи с фотокатодом, чувствительным к инфракрасным лучам, могут быть использованы для киносъемки в темноте.

Изображение на флуоресцирующем экране ЭОП получается видимое, так как этот электронный прибор производит преобразование излучения инфракрасной спектральной области в видимую (желто-зеленую). Одновременно происходит усиление яркости изображения.

Киносъемка экрана электронно-оптического преобразователя производится на кинопленку, наиболее чувствительную к излучению люминофора. Такими кинопленками являются отечественные пленки типа РФ и АС-1.

Необходимо учитывать, что в однокамерном электронно-оптическом преобразователе изображение на флуоресцирующем экране получается повернутым на 180°. Поэтому съемку необходимо производить с обратным ходом киноаппарата или с включением оборачивающей призмы.

Цветная киносъемка в инфракрасных лучах. После опробования ряда возможных вариантов совмещения инфрахроматического слоя с ортохроматическим и панхроматическим практическое применение получили отечественная так называемая спектрозональная кинопленка СН-6 и кинопленка Кодак «Эктахром Инфрарэд Аэро».

Спектрозональная негативная пленка СН-6 имеет два эмульсионных слоя: верхний инфрахроматический с максимумом сенсибилизации 735 *нм* и нижний панхроматический с максимумом сенсибилизации 650 *нм*. Инфрахроматический эмульсионный слой содержит сине-зеленую цветообразующую компоненту, а панхроматический — красную цветообразующую компоненту (рис. 6-11). Так как оба светочувствительных слоя обладают чувствительностью также к синим и фиолетовым лучам, то при съемке применяют

оранжевый светофильтр. Воспроизведение цветов объекта, снятого на спектрозональной пленке СН-6 и напечатанного на обычную цветную позитивную пленку, приведено в табл. 6-2.

Цветная инфрахроматическая кинопленка Кодак «Эктахром Инфрарэд Аэро» является обращаемой; она имеет три эмульсионных

Инфрахроматический слой	Сине-зеленый краситель
Панхроматический слой	Красный краситель
Основа пленки	

Рис. 6-11. Схема спектрозональной кинопленки СН-6

Таблица 6-2

Спектральное отражение объекта съемки	Цвет в позитивном изображении
Мало красного и много инфракрасного	Пурпурный до красного
Мало красного и мало инфракрасного	Зеленый
Много красного и много инфракрасного	Оранжевый

слоя. Верхний эмульсионный слой инфрахроматический (максимум чувствительности приходится на 900 *нм*); средний слой — ортохроматический (зеленочувствительный) и нижний — панхроматический (красночувствительный). Желтый фильтровый слой отсутствует, так как съемка производится через оранжевый светофильтр (рис. 6-12). После проявления этой пленки по методу обращения в инфрахроматическом слое образуется изображение сине-зеленого

Инфрахроматический слой	Сине-зеленый краситель
Зеленочувствительный слой	Желтый краситель
Красночувствительный слой	Пурпурный краситель
Основа пленки	

Рис. 6-12. Схема кинопленки «Эктахром Инфрарэд Аэро»

цвета; в зеленочувствительном — желтое, а в красночувствительном — пурпурное. Воспроизведение цветов объекта приведено в табл. 6-3.

Таблица 6-3

Воспроизведение цветов объекта

Цвет, отражаемый объектом съемки	Цвет изображения
Пурпурный	Зеленый
Пурпурный + инфракрасный	Желтый
Красный	Зеленый
Красный + инфракрасный	Желтый
Желтый	Сине-зеленый
Желтый + инфракрасный	Белый
Зеленый	Синий
Зеленый + инфракрасный	Пурпурный
Сине-зеленый	Синий
Сине-зеленый + инфракрасный	Пурпурно-красный
Синий	Черный
Синий + инфракрасный	Синий или красный
Черный	Черный
Черный + инфракрасный	Красный
Белый	Сине-зеленый
Белый + инфракрасный	Белый
Серый	Синий
Серый + инфракрасный	Пурпурный

Цветовой контраст в спектрозональном изображении как бы дополняет и усиливает возможности черно-белой инфрахроматической пленки. Живая листва деревьев и трава, обладающие высоким отражением и флуоресценцией в инфракрасной области, воспроизводятся различными оттенками красного цвета и возможно слабо голубоватым, в зависимости от интенсивности зеленого. По оттенкам красного цвета можно опознать разные породы деревьев и обнаружить болезни деревьев по изменению отражения инфракрасных лучей, что весьма важно для диагностики заболевания фруктовых деревьев.

Спектрозональная съемка используется также в археологических исследованиях и других областях. В медицине съемка на инфрахроматическую цветную пленку дает возможность увидеть расположение вен под кожным покровом тела лучше, чем это можно наблюдать на снимках, полученных на черно-белой инфрахроматической пленке.

В художественной кинематографии инфрахроматическая цветная кинопленка позволяет реализовать интересные изобразительные решения.

Термографическая фото- и киносъемка. Тепловые лучи длинноволновой области инфракрасного спектра (от 2,0 до 10,0 *мкм*), к которым инфрахроматическая пленка не чувствительна, можно пре-



Рис. 6-13. Термовизионная аппаратура

образовать в лучи видимого света с помощью термоэлектрического элемента и сканирующей телевизионной системы. На этом принципе основаны термовидение и термография.

Инфракрасное изображение предмета, образованное объективом, сканируется зеркальной развертывающей системой и затем фокусируется на термоэлементе, который преобразует тепловые инфракрасные сигналы в электрические видеосигналы. После электронного усиления видеосигналы модулируют электронный луч кинескопа, на экране которого возникает картина ,отображающая распределение температур на поверхности предмета, где светлые участки соответствуют высоким температурам, а темные — низким. Достаточно высокая частота смен кадров на экране кинескопа делает возможной киносъемку изменяющейся картины распределения температур.

На рис. 6-13 показана термовизионная аппаратура «АГА-термовизион» (Швеция), состоящая из блока камеры и блока воспроизведения изображения.

В блок камеры входят: объектив, оптико-механическая система сканирования инфракрасного изображения, высокочувствительный термодетектор и предварительный усилитель видеосигналов.

Основной объектив $f=134$ *мм*, 1 : 1,8 имеет угол изображения 10° при размерах изображения 11,5×11,5 *см*. Дополнительные сменные объективы дают углы обзора 25 и 40°.

Термочувствительный элемент — фотогальванический на антимониде индия (InSb), охлаждается с помощью жидкого азота в резервуаре Дьюара до температуры —196°С, чем обеспечивается его высокая чувствительность в полосе спектра 2000—5600 *нм*.

Сканирование инфракрасного изображения производится со скоростью 1600 *лин/с*. Число линий в кадре 210 при чересстрочной развертке. Частота смен 16 *кадр/с*.

Воспроизводящий блок состоит из телевизионной системы и электронного вычислительного устройства, вырабатывающего сигналы для трансформирования нормального термографического изображения в изотермографическое.

Видеосигналы, до того как они попадут на управляющую сетку электронно-лучевой трубки, обрабатываются электронным устройством. В телевизионной системе воспроизводящего блока используется стандартный кинескоп, экран которого имеет размеры 90×90 *мм*. Для фотографирования и киносъемки используется изображение размером 67×67 *мм*, а полный экран служит только для наблюдения изображения.



Рис. 6-14. Различные виды термографического изображения

На экране можно получить черно-белую картину распределения температур объекта в пределах от 1 до 2000°С. При комнатной температуре тепловая разрешающая способность равна 0,2°С. Чувствительность термоэлемента остается постоянной при удалении исследуемого предмета на несколько сотен метров, как будто бы атмосфера не влияет на прохождение тепловых инфракрасных лучей.

На рис. 6-14 приведены различные виды термографического изображения. Нормальная термограмма показывает относительную разницу температур в виде непрерывного перехода от черного к белому. Холодные зоны поверхности предмета передаются темными тонами, а зонам с высокими температурами соответствуют более светлые участки термограммы.

Электронно-вычислительный блок воспроизводящего устройства позволяет выделять в изображении поверхности с одинаковой температурой и получать изотермы. Это делается посредством наложения на термограмму дополнительного сигнала серого тона, в результате чего все зоны одинаковых температур становятся белыми. Изотермический уровень может выбираться произвольно в пределах диапазона температур, фиксируемых термограммой. Можно одновременно получать две изотермы для разных уровной температуры. Шкала плотностей серого тона, расположенная под термографическим изображением, характеризует распределение температур в 20-градусном диапазоне.

На термограмме с одной изотермой (с шириной 1,8°) значение плотности серого цвета равно 0,55. Если температура сигнала черного цвета отрегулирована на 20°С, то зоны, имеющие температуру 31°С, будут выглядеть ярко-белыми. Изотерма может смещаться вдоль шкалы, обеспечивая тем самым нанесение изображений, соответствующих всем уровням температур внутри выбранного диапазона.

С помощью цветного телевизионного устройства можно фиксировать на одном термографическом изображении до восьми изотермических уровней, причем каждый из уровней выделяется цветом. Способ цветного термографирования используется в случаях сложных термических картин.

Можно получить обращенное термографическое изображение, на котором более теплые зоны предмета получаются темнее, а более холодные — светлее. Изотерма на обращенном изображении остается прежней и выглядит ярко-белой. Контрастирующий фон для изотерм выбирается так же, как при нормальных термограммах, где он является почти белым. Для облегчения выделения изотермы на термограмме серый фон термограммы может быть подавлен, а изображение будет содержать одни изотермы. Такое изображение очень легко дешифрировать, если оно состоит из цветных изотерм. Чтобы выделить одну какую-либо изотерму, достаточно наложить светофильтр соответствующего цвета.

Термографирование используется в различных отраслях науки, техники, биологии и медицины. В технике этот метод необходим при исследовании процессов теплопередачи в аэродинамических трубах и космических аппаратах, а также процессов нагрева, связанных с обработкой металлов, листового стекла, резины и пластмасс, распределения и изменений температур в различных промышленных установках, таких, как плавильные печи, сушильные установки, панели, линии электропередач и силовые агрегаты. Термография имеет большое значение для обнаружения лесных пожаров, поиска людей с самолетов и вертолетов и т. д.

В медицинских исследованиях и диагностике термография применяется для выявления рака груди на ранних стадиях, обнаружения воспалительных процессов вледствие нарушения периферического кровообращения или заболевания сосудов, при ожогах и обмораживании.

Глава 7

КИНОСЪЕМКА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ЛУЧАХ И В СВЕТЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

В ряде научных исследований широко применяют киносъемку в ультрафиолетовых лучах. Свойства многих веществ избирательно поглощать эти лучи и флуоресцировать под их действием лежат в основе двух видов научной фотографии и киносъемки.

Съемка в невидимых ультрафиолетовых лучах, отраженных объектом съемки, когда эти лучи непосредственно воздействуют на светочувствительный слой фотографического материала. Вследствие избирательного поглощения ультрафиолетовых лучей и лучей видимого света различными материалами на снимках, полученных в ультрафиолетовых лучах, могут быть обнаружены характерные особенности химической природы или некоторые подробности структуры объекта, которые малозаметны в лучах видимого спектра.

Чтобы осуществить фотографирование или киносъемку непосредственно в ультрафиолетовых лучах, нужно иметь источник этих лучей и светофильтр, выделяющий их из широкого спектра излучений. Объектив должен обладать способностью пропускать ультрафиолетовые лучи, а фотографический материал иметь достаточную чувствительность к ультрафиолетовым лучам.

С помощью ультрафиолетовых лучей может быть повышена разрешающая способность микроскопа и улучшена возможность обнаружения мелких деталей в изучаемом объекте. Микросъемка в ультрафиолетовых лучах производится на специальном микроскопе с прозрачной для ультрафиолетовых лучей оптикой.

Фотолюминесцентная съемка, то есть фотографическая фиксация холодного свечения различных веществ, возбужденного ультрафиолетовым облучением.

Способностью светиться под действием ультрафиолетовых лучей обладают почти все вещества, за исключением металлов, фарфора, некоторых сортов стекла и немногих других. Свечение различных веществ отличается не только по интенсивности, но и по окраске. Это позволяет распознавать и изучать химический состав многих предметов, определять присутствие в них того или иного вещества и его количественное содержание. На явлении фотолюминесценции основаны такие важные методы современного научного исследования, как люминесцентный анализ и люминесцентная дефектоскопия.

Съемка в свете фотолюминесценции не требует особой оптики, так как она производится в области видимого спектра. Необходим только светофильтр перед объективом, поглощающий отраженные объектом съемки ультрафиолетовые лучи, которые могут завуалировать люминесцентное изображение. Кинопленка должна быть панхроматическая, так как выход фотолюминесценции преобладает в длинноволновой части видимого спектра.

Ультрафиолетовое излучение представляет собой одну из разновидностей лучистой энергии, характеризуемую длинами волн в пределах от 9 до 400 *нм*. В электромагнитном спектре ультрафиолетовые лучи занимают промежуточное положение между видимым светом и лучами Рентгена.

Коротковолновая часть ультрафиолетового излучения от 9 до 160 *нм*, особенно с длинами волн короче 120 *нм*, сильно поглощается всеми известными материалами и средами, включая воздух, и поэтому такие лучи могут быть получены только в вакууме.

Приблизительные значения коротковолновой границы пропускания разных материалов

Стекло оптическое	320—350 *нм*
Стекло оконное	300—320 *нм*
Канадский бальзам	320 *нм*
Целлулоид 0,2 *мм*	295 *нм*
Целлофан тонкий	260 *нм*
Парафин 0,2 *мм*	220 *нм*
Желатина 0,1 *мм*	200 *нм*
Вода	175 *нм*
Кварц кристаллический 1 *мм*	160 *нм*
Флюорит	125 *нм*

Область от 120 до 400 *нм* принято условно подразделять на три части.

Ближняя к видимому спектру область ультрафиолетового излучения (320—400 *нм*) содержит лучи, широко применяемые для люминесцентного анализа, а также для возбуждения светящихся веществ при люминесцентной фотографии и киносъемке.

Средняя область (с длинами волн от 275 до 320 *нм*) характеризуется способностью вызывать покраснение и загар человеческой кожи и благотворным действием (в определенных дозах) на рост и развитие животных и растений.

Дальняя область (в пределах длин волн от 120 до 275 *нм*) представляет излучения, обладающие свойством озонировать воздух и убивать бактерии. Эта же область ультрафиолетового излучения используется в газосветных люминесцентных источниках света для получения яркой флуоресценции светящихся составов, которыми покрыты трубки (с внутренней стороны) люминесцентных ламп.

Нужно отметить, что деление ультрафиолетового спектра на перечисленные области условно, так как свойства ультрафиолетовых

лучей, приписываемые одной области спектра, присущи частично и соседним областям, хотя и в меньшей степени.

Важной особенностью ультрафиолетовых лучей, отличающих их от лучей Рентгена и других, более коротковолновых излучений, является то, что они преломляются на границе раздела сред с различной плотностью и отражаются от зеркальных поверхностей. Это дает возможность фокусировать их с помощью объектива, сделанного из пропускающих ультрафиолетовые лучи материалов, и получать действительное ультрафиолетовое невидимое изображение, которое можно зафиксировать на фотопленке и таким образом сделать видимым.

Наиболее мощным естественным источником ультрафиолетового излучения является солнце. Однако земной поверхности достигают только ультрафиолетовые лучи с длиной волны не менее 290 *нм*. Более коротковолновые ультрафиолетовые лучи полностью поглощаются озоном, содержащимся в относительно большом количестве в стратосфере. Спектральное распределение ультрафиолетового излучения зависит от высоты солнца над горизонтом. Чем ближе солнце к горизонту, тем меньше в солнечном свете ультрафиолетовых лучей. При высоте солнца 1° над горизонтом в составе солнечной радиации, достигающей поверхности земли, не содержится излучений с длинами волн короче 420 *нм*, то есть ультрафиолетовые лучи в спектре излучения восходящего и заходящего солнца полностью отсутствуют.

Основными искусственными источниками ультрафиолетового излучения во всех участках ультрафиолетовой области спектра являются ртутные лампы высокого давления и ртутные лампы сверхвысокого давления.

Ртутные лампы высокого давления ПРК (прямая ртутно-кварцевая) используют дуговой разряд в парах ртути между двумя вольфрамовыми электродами внутри трубки, изготовленной из кварца. Газовый разряд протекает в этих лампах при давлении 400—700 *мм* ртутного столба. Свечение образует по оси трубки яркий светящийся шнур. Ртутные лампы высокого давления дают линейчатый спектр излучения. Наибольшая энергия приходится на ближнюю ультрафиолетовую область спектра с максимумом 365 *нм*. Помимо спектральных линий ртутные лампы высокого давления излучают слабый сплошной спектр, составляющий несколько процентов от общего светового потока лампы.

Ртутные лампы сверхвысокого давления СВД изготовляются двух видов: с воздушным и водяным охлаждением. Лампа СВД с воздушным охлаждением имеет форму толстостенного шара из плавленого кварца, в который впаяны два вольфрамовых электрода. После испарения ртути в лампе развивается давление до 50 *атм* и возникает очень высокая яркость свечения. Лампа СВД с водяным охлаждением представляет собой короткую кварцевую трубку с внутренним диаметром около 1 *мм*. Давление паров ртути в трубке достигает 100 *атм*. Такая лампа заключена во вторую трубку из кварца или специального стекла. Между стенками лампы и внеш-

ней трубкой течет охлаждающая вода. Ртутные лампы сверхвысокого давления дают белый свет, но в спектре их излучения содержится значительное количество ультрафиолетовой радиации.

В табл. 7-1 приведены характеристики ртутных ламп ПРК и СВД.

Таблица 7-1

Характеристики ртутных ламп ПРК и СВД

Тип лампы	Напряжение, *В*	Ток, *А*	Мощность, *Вт*
ПРК-4	127	3,8	220
ПРК-2	220	2,8	375
ПРК-7	220	8	1000
СВД-120А	127	2	120
СВДШ-250	127	4,1	250
СВДШ-1000	220	11	1000

В качестве искусственных источников ультрафиолетового излучения могут быть использованы также ртутно-аргоновые лампы ИГАР, ксеноновые лампы ДКсШ, лампы ДРШ, люминесцентные эритемные лампы ЭУВ и угольные дуговые лампы, в спектрах излучения которых содержится значительное количество ультрафиолетовых лучей.

Светофильтры для выделения ультрафиолетовых лучей. Для выделения ультрафиолетовых лучей из спектра излучения ртутных и других источников света применяют различные светофильтры.

Как правило, почти все светофильтры, изготовленные из специального стекла, пропускают кроме лучей ультрафиолетовых также лучи длинноволновой зоны видимого спектра с длиной волны более

Таблица 7-2

Данные светофильтров из цветного стекла для выделения ультрафиолетового излучения

Марка стекла	Максимальное пропускание, *нм*	Коэффициент пропускания в % при толщине стекла 2 *мм*, при источнике света с цветовой температурой		Выделяемая область ультрафиолетового излучения, *нм*
		2848 К	4800 К	
УФС-1	330	0,45	0,30	240—400
УФС-2	330	0,02	0,01	270—380
УФС-3	360	0,01	0,005	320—390
УФС-4	370	0,02	0,007	340—390
ФС-1	400	0,20	0,50	330—460
ФС-6	380	0,19	0,44	290—460
ФС-7	360	0,05	0,11	300—440

500 *нм*. Этот свет в большинстве случаев не мешает работе, так как для съемки в ультрафиолетовых лучах применяются фотографические материалы, не сенсибилизированные к длинноволновой зоне видимого спектра.

Наиболее подходящим для выделения широкой полосы ультрафиолетовой части спектра является черное увиолевое стекло.

В табл. 7-2 приведены данные стеклянных окрашенных в массе светофильтров, изготовляемых отечественной промышленностью и предназначенных для выделения ультрафиолетового излучения. Кривые пропускания этих светофильтров даны на рис. 7-1.

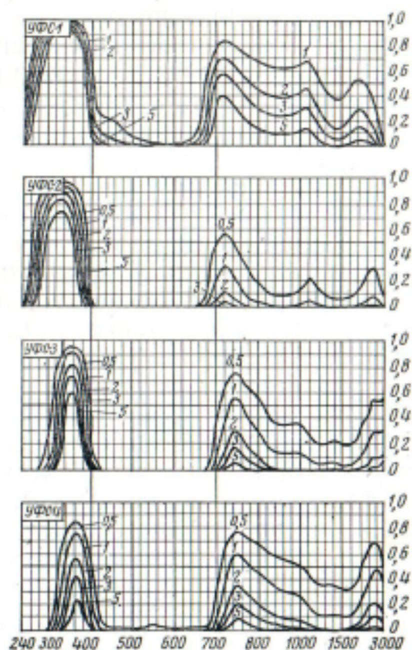


Рис. 7-1. Кривые пропускания светофильтров УФС

Из стекол УФС-3 и УФС-4 изготовляют колбы так называемых «черных ламп» или колпаки, в которые заключаются источники ультрафиолетового излучения, а также плоские светофильтры для прожекторов и софитов.

Для выделения участка спектра от 310 до 340 *нм* с максимумом 325 *нм* применяют серебряный светофильтр. На пластинку из кварца химическим или другим способом наносят тонкий слой серебра. Толщина серебряного слоя должна быть такой, чтобы сквозь него, если смотреть на солнце, был виден синий диск, но очертания крыш домов на фоне неба не были видны. Для защиты нанесенного серебряного слоя от механических повреждений его накрывают второй (покровной) пластинкой из кварца с прокладкой по краям из фильтровальной бумаги и обклеивают по краям.

Растворы некоторых химических веществ пропускают разные участки спектра в ультрафиолетовой области. Жидкостные светофильтры, как правило, имеют широкие полосы пропускания, но сильно ослабляют излучение. Незначительные загрязнения химических реактивов приводят к еще более сильному уменьшению коэффициента пропускания. Многие растворы под действием ультрафиолетовой радиации быстро портятся и их пропускание резко ухудшается. По причине нестабильности жидкие светофильтры применять избегают.

Для выделения более коротковолновой ультрафиолетовой радиации — от 200 до 300 *нм* — особый интерес представляет газовый светофильтр, в котором в качестве поглощающего вещества используются смеси хлора и брома в газообразном состоянии. Этот

светофильтр имеет высокий коэффициент пропускания в сравнительно широком спектральном интервале длин волн, достигающий примерно $\lambda=270$ *нм* своего максимального значения 47%. Газовый светофильтр отличается постоянством и может быть применен для выделения широкой полосы ультрафиолетового спектра.

В тех случаях, когда необходимо выделить определенные линии из спектров источников ультрафиолетового излучения, как, например, при микросъемке, для достижения наибольшей резкости изображения можно применить кристаллические светофильтры. Кристаллы щелочно-галоидных солей (KCl, KBr) с примесями таллия и свинца обладают свойством пропускать узкие полосы ультрафиолетового излучения. Однако кристаллические светофильтры необходимо применять в совокупности с газовым светофильтром, чтобы поглотить длинноволновую часть спектра.

Кристаллические светофильтры изготовляют из расплава солей путем выращивания монокристаллов, которые могут быть получены диаметром до 150 *мм* и высотой до 150 *мм*. Из полученных монокристаллов вырезаются пластинки, которые затем шлифуются, как оптические детали. Так как кристаллы щелочно-галоидных солей гигроскопичны, то их необходимо защищать от влаги. Для этого их покрывают кварцевыми пластинками толщиной 0,5—1 *мм*. Кристаллические светофильтры обладают стойкостью по отношению к ультрафиолетовому излучению, постоянством свойств во времени и в отличие от других светофильтров выделяют более узкие участки в ультрафиолетовой области спектра со значительно меньшими потерями внутри полосы пропускания. Кроме того, полосу пропускания можно в известных пределах перемещать по спектру в зависимости от процентного содержания компонентов смешанного кристалла, что дает возможность строить светофильтры для пропускания нужных длин волн и лучше приспосабливать их к конкретным требованиям эксперимента.

Объективы для съемки в ультрафиолетовых лучах. Оптическое стекло в зависимости от сорта пропускает ультрафиолетовые лучи только длинноволновой зоны, не короче 320—350 *нм*. Поэтому обычные объективы пригодны для съемки лишь в ультрафиолетовых лучах, близких к лучам видимого фиолетового света. Прозрачность различных объективов даже в этой зоне ультрафиолетового спектра неодинакова, она зависит от сортов стекла и длины пути луча в стекле. Многолинзовые объективы пропускают меньше ультрафиолетовых лучей, чем более простые. При почти одинаковой конструкции объективов пропускание ими ультрафиолетовых лучей может сильно разниться. Так, объектив «Ксенар» $f=150$ *мм*, 1 : 4,5 пропускает 37% ультрафиолетового излучения с длиной волны 366 *нм*, в то время как объектив «Зоннар» $f=50$ *мм*, 1 : 1,5 пропускает только 5%.

Для съемок в ультрафиолетовых лучах средней зоны применяются специальные объективы, изготовленные из прозрачного кварца, каменной соли или флюорита.

Прозрачный кварц (двуокись кремния SiO_2) отличается большим пропусканием не только в видимой области спектра, но также в ультрафиолетовой и инфракрасной. Ультрафиолетовые лучи пропускаются им с некоторым поглощением до длины волны 160 *нм*. Кварцевое стекло получают путем плавления кварца в электропечи при водородно-кислородном пламени. В зависимости от метода обработки и от примесей кварцевой шихты полученное стекло может быть совершенно бесцветным, прозрачным, полупрозрачным, непрозрачным или опаловым. В последнем случае оно называется витреозилом.

Другой материал — флюорит (плавиковый шпат CaF_2 — фторная соль кальция) — обладает еще большей проницаемостью для ультрафиолетовых, а также инфракрасных лучей. Природные кристаллы флюорита иногда имеют большие размеры (до 25 *см*) в поперечнике. Эти кристаллы большей частью окрашены в различные оттенки фиолетового, зеленого, желтого, бурого, синего, реже — красного цвета. При нагревании окраска исчезает, возвращаясь при действии на кристаллы радиоактивных излучений, паров кальция и электрических разрядов. Для изготовления оптических деталей используют совершенно прозрачные кристаллы флюорита. Флюорит обладает очень малой дисперсией, что значительно упрощает конструкцию изготовленных из него объективов.

Кварцевые и флюоритовые фотографические объективы и объективы для микроскопов бывают двух типов: хроматически коррегированные и хроматически некорригированные. В качестве примера приводим описание двух фотографических объективов для съемки в ультрафиолетовых лучах фирмы «Карл Цейсс Йена» (ГДР).

УФ-объектив $f=60$ *мм*, 1 : 4 предназначен для съемки в ближней зоне ультрафиолетового спектра от 400 до 300 *нм*. Объектив состоит из трех линз, слабо поглощающих лучи ближней ультрафиолетовой зоны. Он хроматически коррегирован и имеет диафрагму. При съемке применяется светофильтр UG-2, максимальное пропускание которого 365 *нм*. Светофильтр пропускает немного красного света, что не имеет значения, так как съемка в ультрафиолетовых лучах производится на пленку, не сенсибилизированную к лучам красной зоны видимого спектра.

Объектив «Кварц-штейнзальц-анастигмат» $f=120$ *мм*, 1 : 4,5 предназначен для съемки в ультрафиолетовых лучах средней зоны вплоть до 200 *нм*. Этот объектив состоит из пяти линз. Вторая и третья из четырех кварцевых линз замыкают между собой линзу, изготовленную из каменной соли, с помощью которой осуществляется хроматическая коррекция объектива для ультрафиолетовой зоны 215 *нм* и видимой части спектра. При съемке в невидимых ультрафиолетовых лучах применяется имеющийся в комплекте серебряный светофильтр, который задерживает все лучи видимого света и имеет максимальное пропускание в ультрафиолетовой области около 313 *нм*. Кратность серебряного светофильтра при свете угольной дуги равна примерно 12000^x.

Максимальный угол изображения объектива 35°. Его коррекция рассчитана для масштаба изображения 1 : 5. При съемке в других масштабах резкость изображения понижается. Так как невидимые ультрафиолетовые лучи образуют действительное изображение в плоскости, приближенной к объективу, нежели лучи видимые, то нужно вводить фокусную поправку. Устанавливают на объектив желтый светофильтр и фокусируют изображение на матовом стекле кинокамеры; затем удаляют желтый светофильтр, ставят на его место серебряный светофильтр и уточняют фокусировку введением фокусной поправки, придвигая объектив к пленке. При масштабе изображения 1 : 5 и 1 : ∞ фокусная поправка составляет 1 *мм*, а при масштабе 1 : 1 — 3 *мм*. Эти данные являются приблизительными, при других источниках освещения они могут отличаться. Поэтому необходимо делать пробные съемки для уточнения фокусировки.

Фотографические материалы для съемки в ультрафиолетовых лучах. Обычные фотографические материалы весьма малочувствительны к ультрафиолетовому излучению, что обусловлено сильным поглощением ультрафиолетовых лучей желатиной эмульсионного слоя.

Для повышения чувствительности фотографической эмульсии к ультрафиолетовым лучам в 1901 году был предложен способ изготовления фотопластинок, который заключался в том, что галогениды серебра наносились осаждением на пластинку, уже покрытую слоем желатины, образуя тонкий поверхностный слой. Так называемые фотопластинки Шумана, в которых желатина уже не препятствовала действию ультрафиолетовых лучей на галогениды серебра, показали в 200 раз более высокую чувствительность к доступным для кварцевой оптики лучам ультрафиолетовой области спектра.

Позднее появились другие способы повышения чувствительности фотографических материалов к ультрафиолетовым лучам: удалением части желатины из эмульсионного слоя с помощью кислот, введением в эмульсионный слой флуоресцирующих веществ или же смазывание поверхности эмульсионного слоя флуоресцирующими веществами.

Для покрытия эмульсионного слоя пригодны такие флуоресцирующие вещества, как, например, смесь бензола со следами парафинового или машинного масла, эфирный раствор так называемой замазки Рамсая, состоящей из вазелина и каучука, а также раствор эскулина в глицерине. Однако такой способ неудобен потому, что перед проявлением экспонированных пленок необходимо удалять нанесенный на поверхность эмульсии масляный слой

Наиболее приемлемым, особенно для кинопленок, является способ сенсибилизации к ультрафиолетовому излучению, который заключается в погружении светочувствительной кинопленки в 1%-ный спиртовой раствор салициловой кислоты или салициловокислого натрия. После купания в течение 1—2 *мин* кинопленка высушивается.

Проявление после экспонирования сенсибилизированных таким способом фотографических материалов производится обычным способом, без предварительной промывки.

Фотографические материалы, сенсибилизированные к ультрафиолетовым лучам при помощи салициловой кислоты или салициловокислого натрия, выдерживают длительное хранение без изменения их фотографических свойств, так как салициловая кислота и ее соли не влияют на свойства фотографической эмульсии. Салициловая кислота и ее соли не оказывают влияния и на свойства проявляющих растворов.

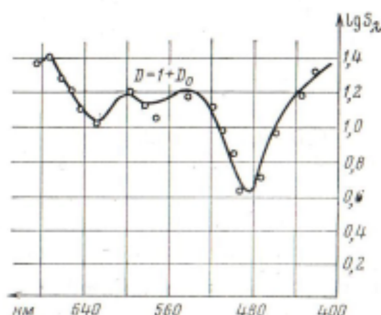


Рис. 7-2. Распределение спектральной чувствительности пленки УФШ-панорто

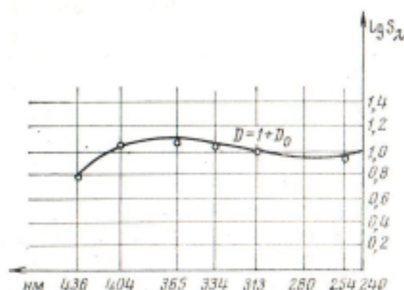


Рис. 7-3. Распределение спектральной чувствительности пленки УФШ-0

Для сенсибилизации к ультрафиолетовым лучам лучше всего использовать кинопленки, не сенсибилизированные к длинноволновой части видимого спектра, такие, как позитивная пленка или пленка для звукозаписи.

В настоящее время имеется три типа фото- и кинопленок, предназначенных для съемки в ультрафиолетовых лучах, доступных для кварцевой оптики: 1) УФШ-панорто, — чувствительная в ультрафиолетовой области до 230 *нм* и ко всему видимому спектру вплоть до 700 *нм*; 2) УФШ-0, — чувствительная в ультрафиолетовой области до 230 *нм* и в видимой области до 500 *нм*; 3) УФШ-4, — чувствительная только к невидимым ультрафиолетовым лучам в пределах от 180 до 400 *нм*.

На рис. 7-2 и 7-3 показно распределение спектральной чувствительности пленок УФШ-панорто и УФШ-0. Фотографические характеристики пленок типа УФШ приведены в табл. 7-3.

Киносъемка в свете фотолюминесценции, возбужденной ультрафиолетовыми лучами. Фотолюминесценцией называют одну из разновидностей люминесценции *, а именно — холодное свечение вещества под воздействием коротковолнового светового или ультра-

* Существует много видов люминесценции, например электролюминесценция (или катодолюминесценция) — свечение вещества под воздействием электронных лучей, что используется в электронно-лучевых трубках.

Таблица 7-3

Фотографические характеристики фото- и кинопленок для съемки в ультрафиолетовых лучах

Тип пленки	Видимая область спектра		Кварцевая область спектра		Оптическая плотность вуали, D_0	Разрешающая способность, *лин/мм*
	светочувствительность в ед. ГОСТ, $(0{,}85+D_0)$	коэффициент контрастности, γ	чувствительность в относительных единицах к линии, $\lambda = 230$ *нм*	коэффициент контрастности, $\lambda = 230$ *нм*		
УФШ-панорто	2000—2500	2,0—2,2	6—7	0,6—0,7	0,20	80—90
УФШ-0 .	500—600	1,8—2,2	10—13	0,9—1,1	0,08	100—110
УФШ-4 .	60—80	3,5—4,0	4—5	1,5—1,6	0,08	130—140

фиолетового излучения. Различают два случая: первый, когда свечение продолжается и после окончания облучения (фосфоресценция), и второй, когда свечение практически наблюдается лишь во время самого облучения возбуждающими лучами (флуоресценция). Это разделение в значительной мере условное, так как флуоресценция и фосфоресценция могут обнаруживаться одновременно у одного и того же вещества. Чистая флуоресценция наблюдается большей частью у органических соединений, а также у некоторых неорганических комплексных соединений. Послесвечение длительное — фосфоресценция — наблюдается, как правило, за немногими исключениями только у неорганических веществ.

Согласно правилу Стокса, длина волны излучаемого света флуоресценции или фосфоресценции больше длины волны возбуждающих лучей. Для получения наиболее полного спектра фотолюминесценции практически весьма рационально возбуждать фотолюминесценцию с помощью длинноволновой части невидимого ультрафиолетового излучения с длинами волн в пределах от 300 до 400 *нм*.

Обычно энергетический выход фотолюминесценции, то есть отношение поглощенной веществом энергии ультрафиолетовых лучей к энергии, получаемой им в виде люминесценции, составляет около 0,01%. Поэтому для съемки в свете люминесценции необходимо применять достаточно мощные источники ультрафиолетового излучения, высокочувствительные фотоматериалы и светосильную оптику.

Метод киносъемки в свете фотолюминесценции состоит в том, что объект, освещаемый невидимыми ультрафиолетовыми лучами или коротковолновым видимым (фиолетовым и синим) светом, сам светится голубым, зеленым, желтым, оранжевым или красным цветом. Объект съемки должен для этого обладать способностью флуоресцировать или фосфоресцировать либо содержать специально введенные в него или нанесенные на его поверхность флуоресцирующие или фосфоресцирующие вещества. Съемка должна произ-

водится на цветную пленку, так как фотолюминесценция разных веществ отличается не только по интенсивности, но и главным образом по цвету. Свет фотолюминесценции видимый, поэтому для фиксации этого свечения не требуется специальной съемочной оптики. Необходимо только поместить перед объективом съемочной камеры светло-желтый светофильтр, чтобы отсечь отраженные объектом съемки ультрафиолетовые, фиолетовые и синие лучи. Без такого светофильтра светочувствительный слой может быть сильно завуалирован и собственное свечение вещества будет слабо заметно.

Фотографирование и киносъемка в свете фотолюминесценции применяются при люминесцентном анализе, в задачу которого входит определение присутствия того или иного вещества и его количественного содержания в исследуемых пробах, наблюдение происходящих в веществе химических изменений и т. д.

Метод люминесцентного анализа находит применение в геологии и петрографии, где он дает возможность определять состав исследуемых образцов породы и минералов. В текстильной, бумажной, фармацевтической и других отраслях промышленности с помощью фотолюминесценции определяют чистоту химикатов, производят сравнение красителей и т. п. В сельскохозяйственном производстве люминесцентный анализ служит средством отбора портящихся овощей, фруктов и их семян на ранней стадии этого процесса, когда он еще не может быть обнаружен другими способами. Например, по цвету фотолюминесценции срезов картофеля можно отделить больные клубни от здоровых, обнаружить сорняки среди семян или примесь спорыньи в муке.

Широкое применение в технике находит метод люминесцентной дефектоскопии, позволяющий обнаружить тонкие, неразличимые глазом трещины в металле и других материалах. Деталь помещают в ванну с флуоресцирующим раствором, нагретым до температуры, близкой к кипению. Раствор проникает в мельчайшие трещины изделия. Деталь вынимают из раствора, промывают и с помощью ультрафиолетового облучения вызывают флуоресценцию остающегося в трещинах флуоресцирующего вещества. На темном фоне металла вырисовываются все трещины и другие дефекты поверхности, в которые проник флуоресцирующий раствор.

В лабораториях криминалистики и судебной медицины люминесцентный анализ широко применяется как тонкое средство экспертизы, позволяющее обнаружить всякого рода подделки, фальсификации и скрытые следы преступлений. Без применения химических методов, которые всегда оставляют следы, с помощью аналитической лампы ультрафиолетового излучения легко обнаруживают подделку денег, документов и т. п., так как даже небольшое различие в сортах бумаги и в красках сказывается на флуоресценции. Подобным образом удается обнаружить подделку печатей и подправки на штампах почтовых марок. Можно даже установить, когда наносились пометки, если они сделаны в разное время.

При исследовании картин в ультрафиолетовых лучах устанавливают более поздние добавления или другие подделки и делают

важные заключения о действительном возрасте картин, так как применявшиеся прежде краски и лаки люминесцируют иначе, чем применяемые в настоящее время.

Большое практическое значение приобрела люминесцентная микрофотография и микрокиносъемка. Посредством фотолюминесценции возможно оптически выделить совершенно неразличавшиеся ранее части некоторых микропрепаратов, дифференцировать очень близкие между собой виды микроорганизмов, отличить мертвые клетки от здоровых, исследовать перемещение и действие в организме ряда лекарственных веществ, как, например, хинина, акрихина и других, обнаруживать некоторыми организмами их продуктов обмена, изучать влияние наркотиков на живую клетку и механизм отмирания клеток, а также исследовать ряд других явлений и процессов.

Метод люминесцентной микроскопии подразделяется на два способа. Первый способ заключается в выявлении и использовании присущих ряду объектов естественных свойств флуоресцировать под воздействием ультрафиолетовых лучей или коротковолнового видимого света. Так, например, хлорофилл обладает ярко-красной флуоресценцией. Благодаря этому удается обнаруживать ранние стадии образования хлорофилла в растительных клетках и связать его с определенными клеточными структурами. Пигменты некоторых микроорганизмов также хорошо флуоресцируют голубым или светло-белесым светом. Это дает возможность обнаруживать и идентифицировать важные формы бактерий даже при наличии небольшого количества клеток в поле зрения. Ярко флуоресцируют витамины А и B_2 (рибофлавин) и несколько слабее B_6 (пиридоксин). Некоторые производные витамина B_1 и никотиновой кислоты также отличаются яркой флуоресценцией.

Второй способ люминесцентной микроскопии основан на применении некоторых флуоресцирующих веществ, так называемых флуорохромов, специально вводимых в препарат для придания объектам микроисследования свойства флуоресцировать. Свечение флуорохромированных объектов в большинстве случаев более яркое, чем их природная люминесценция.

В качестве флуорохромов используются разнообразные красители: тиазоловые, ксантеновые, хинолиновые, азокраски и особенно производные акридина. Наряду с этим успешно применяются естественные флуоресцирующие пигменты (хлорофилл, порфирин), алкалоиды (берберин, хинин) и ряд других бесцветных органических соединений.

Некоторые флуорохромы в определенных условиях способны создать исключительно эффектную разноцветную картину. Один и тот же флуорохром, например аурофосфин, одновременно и контрастно выявляет протоплазму темно-зеленым свечением, хондриосомы — оранжевым, ядра — ярким светло-зеленым и т. д.

Глава 8

РЕНТГЕНОКИНОСЪЕМКА

Лучи Рентгена обладают способностью проникать через непрозрачные для видимого света тела. При этом происходит их частичное поглощение или рассеяние, в зависимости от плотности и толщины вещества, что дает возможность обнаруживать неоднородности внутри непрозрачных предметов. Но рентгеновские лучи невидимые, они не воспринимаются непосредственно глазами человека. Практическое использование рентгеновских лучей для получения картины внутреннего строения непрозрачных предметов возможно благодаря их свойству вызывать свечение люминофоров и воздействовать на фотографические слои подобно лучам видимого света, образуя скрытое изображение, которое после проявления становится видимым.

Применение рентгеновских лучей связано с большими трудностями вследствие того, что они оказывают сильное биологическое действие на живые организмы. Хотя в небольших дозах рентгеновское облучение применяется в медицине для лечения некоторых кожных и внутренних заболеваний (рентгенотерапия), но продолжительное действие рентгеновских лучей чрезвычайно вредно и может привести к непоправимым тяжелым последствиям.

Рентгеновские лучи распространяются прямолинейно, но в отличие от лучей световых они практически не претерпевают преломления при прохождении через тела различной плотности и поэтому не могут быть сформированы с помощью оптических систем. Электростатическое или магнитное поле также не может на них воздействовать.

Излучаемые рентгеновской трубкой лучи, распространяясь прямолинейно, падают на исследуемый объект и, в зависимости от толщины и неоднородности строения его, подвергаются бóльшему или меньшему ослаблению вследствие поглощения и рассеяния. Достигшие рентгеновского экрана, покрытого люминофором, лучи вызывают его свечение (флуоресценцию). Яркость свечения отдельных участков экрана будет неодинакова, так как зависит от интенсивности падающего рентгеновского излучения. Так возникает рентгеновское изображение, которое является теневым.

Фотографирование изображения светящегося рентгеновского экрана с помощью фотоаппарата получило название флуорографии. Светящийся рентгеновский экран можно снимать также киноаппаратом — это будет флуорографическая киносъемка (рис. 8-1, *а*).

Если рентгеновский экран заменить фотопленкой и проэкспонировать ее непосредственно рентгеновскими лучами, а затем проявить фотопленку, то будет получена рентгенограмма. Получение последовательно экспонированной серии рентгенограмм для создания кинофильма называется рентгенографической киносъемкой (рис. 8-1, *б*).

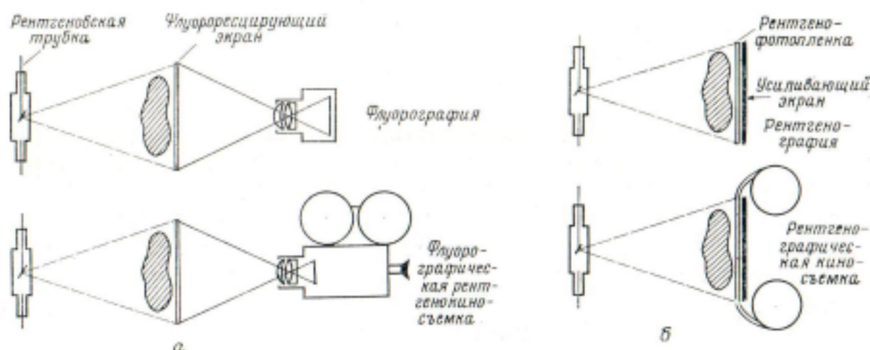


Рис. 8-1. Способы регистрации рентгеновского изображения

Рентгеновские лучи широко используются в медицине для изучения внутреннего строения живых организмов и внутренней диагностики человека с целью обнаружения всякого рода заболеваний путем нахождения минимальных отклонений внутренних органов от нормы. При этом весьма важно обнаружить едва заметные отклонения в строении и функционировании организма, чтобы своевременно обнаружить болезнь и предпринять эффективное лечение. Ценность рентгеновской диагностики целиком зависит от возможности различения мелких деталей в изображении на рентгеновском экране. Однако это изображение обладает ничтожно малой яркостью (от 0,01 до 0,1 *кд/м*²), почти в 10^5 раз меньше, чем яркость предметов при солнечном освещении.

При визуальном наблюдении изображения на рентгеновском экране участвует только палочковый аппарат сетчатки глаза, когда острота зрения значительно снижена. Поэтому важнейшей задачей является улучшение условий рассматривания рентгеновского изображения. Здесь на помощь приходит рентгенография и флуорография. Рентгенограмму или флуорограмму можно рассматривать и анализировать в оптимальных условиях, когда работает не только палочковый, но и колбочковый аппарат глаза человека, обеспечивающий лучшую остроту зрения. Таким образом, получение рентгеновских снимков (рентгенограмм или флуорограмм) важно не

только для документации наблюдаемой картины, но главным образом для получения большей информации.

Рентгенографическая и флуорографическая съемка фиксирует состояние организма лишь в отдельные моменты времени, что часто оказывается недостаточным для диагностики заболевания, и возникает необходимость в применении киносъемки, чтобы получить возможность изучать деятельность внутренних органов в их движении и взаимодействии. В некоторых случаях необходима замедленная киносъемка, как, например, при исследовании перистальтики желудка. Для этих целей вполне достаточна частота съемки 4 *кадр/с* в продолжение 45 *с*. Просмотр на экране кинофильма при частоте проекции 24 *кадр/с*, с ускорением в шесть раз дает возможность обнаружить нарушение функционирования отдельных участков желудка. При исследовании деятельности сердца, когда в кровь добавляют контрастное вещество, требуется скоростная киносъемка, так как скорость движения крови при наполнении желудочков сердца и протекании по крупным кровеносным сосудам достигает 1 *м/с*.

Применение рентгенокиносъемки в естествознании дает возможность изучать функционирование внутренних органов огромного многообразия живых организмов, а также видоизменения, происходящие в растениях.

Рентгенокиносъемка дает возможность изучать взрывные явления и процессы горения, связанные с образованием дыма, затрудняющего прямое наблюдение и съемку, а также взаимодействие частей в закрытых механизмах.

Лучи Рентгена и рентгеновское изображение. В спектре электромагнитных колебаний рентгеновские лучи занимают положение между ультрафиолетовыми лучами и гамма-лучами. Диапазон длин волн лучей Рентгена простирается от 100 до 1 *нм*.

Рентгеновские лучи возникают, когда быстро движущиеся в вакууме электроны резко затормаживаются поставленной на их пути материальной преградой. Большая часть энергии электронов превращается в тепло и только ничтожная часть их энергии (около 0,1—1,0%) переходит в энергию лучей Рентгена.

Рентгеновская трубка (рис. 8-2) представляет собой вакуумную стеклянную колбу, внутри которой находятся накаливаемая электрическим током вольфрамовая нить (катод) и медный анод с вольфрамовым зеркалом. Если накалить вольфрамовую нить катода до определенной температуры и приложить к трубке высокое напряжение (плюс — к аноду, минус — к катоду), то электроны, испускаемые катодом, приобретя под воздействием электрического поля бóльшую скорость, будут сталкиваться с анодом и в результате торможения возбуждать рентгеновские лучи. Сила тока через трубку зависит от температуры спиральной нити, а скорость электронов определяется приложенным напряжением между анодом и катодом.

Участок поверхности анода, являющийся источником рентгеновских лучей, называется фокусом трубки. Для получения наиболее

резкого рентгеновского изображения на экране или фотопленке необходимо, чтобы фокус трубки представлял собой почти точку. Это достигается посредством особой конструкции рентгеновской трубки. Активная поверхность катода делается в виде вогнутого зеркала, концентрирующего электронные лучи, распространяющиеся по нормалям к поверхности катода, на аноде в более или менее острый фокус.

Так как большая часть катодных лучей превращается в тепло, то анод рентгеновской трубки быстро нагревается, что ограничивает силу тока, а следовательно, и мощность рентгеновского излучения. Поэтому анод делают полым и заполняют водой, которая, как из-

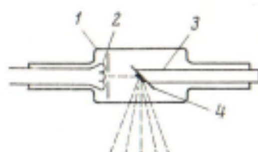


Рис. 8-2. Устройство рентгеновской трубки:
1 — колба; 2 — катод; 3 — анод; 4 — зеркало

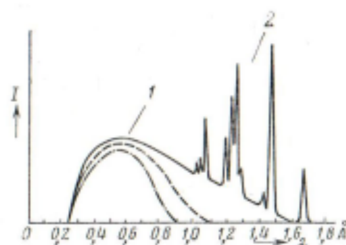


Рис. 8-3. Спектр рентгеновского излучения, получаемый из трубки с вольфрамовым анодом при напряжении 50 *кВ*:
1 — лучи торможения; 2 — характеристические лучи

вестно, обладает высокой теплоемкостью. Для повышения мощности рентгеновского излучения создаются рентгеновские трубки с вращающимся анодом.

Рентгеновское излучение состоит из лучей торможения, которые дают непрерывный спектр, имеющий резко выраженную границу со стороны коротких волн, и характеристических лучей, дающих линейчатый спектр, зависящий от строения атомов металла, о который тормозятся электроны (рис. 8-3). Длинноволновая часть рентгеновского излучения сильно поглощается стенками стеклянной колбы.

Спектр рентгеновского излучения зависит от условий его возбуждения. С повышением анодного напряжения увеличивается количество коротковолновых рентгеновских лучей, которые обладают большей проникающей способностью.

По своей проникающей способности рентгеновское излучение подразделяется на три вида. Получаемые при напряжении на аноде, равном 15—20 *кВ*, мягкие рентгеновские лучи обладают сравнительно небольшой проникающей способностью. Такие лучи применяются для просвечивания небольших биологических объектов, также мутных сред, дымов и т. п. При анодном напряжении 45—65 *кВ* получаются лучи средней жесткости, которые наиболее широко применяются в медицинской диагностике. Эти лучи достаточно хо-

рошо просвечивают корпус человека. Жесткие лучи получаются при напряжениях свыше 65 *кВ,* и они применяются главным образом, когда просвечиванию подвергаются металлические объекты.

Ослабление рентгеновских лучей вследствие поглощения и рассеяния зависит от длины волны излучения, а также от толщины и плотности просвечиваемого вещества. Жесткие лучи рассеиваются материей сильнее, а мягкие больше поглощаются, чем рассеиваются. Контраст изображения больше при мягком и меньше при жестком излучении.

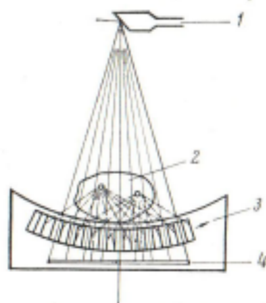


Рис. 8-4. Действие решетчатой бленды, поглощающей рассеянные рентгеновские лучи:
1 — анод рентгеновской трубки; *2* — просвечиваемый объект; *3* — решетчатая бленда; *4* — флуоресцирующий экран

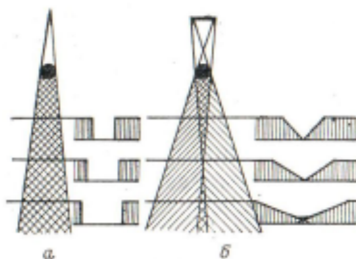


Рис. 8-5. Образование теневого изображения:
а — при точечном источнике излучения; *б* — при источнике излучения, имеющем конечные размеры

На качество рентгеновского изображения оказывают сильное влияние рассеянные объектом лучи. Их действие выражается в снижении контраста и резкости изображения. Для уменьшения действия рассеянных рентгеновских лучей применяют решетчатую бленду (рис. 8-4), состоящую из свинцовых ламелей, стоящих параллельно ходу прямых лучей. Эта решетка помещается между объектом и экраном (или фотопленкой), она поглощает значительную часть рассеянных объектом рентгеновских лучей. Вместо решетки часто применяют тонкий металлический лист (фольгу), что также несколько уменьшает действие на экран рассеянных рентгеновских лучей.

Резкость рентгеновского изображения зависит от ряда факторов. Если не учитывать влияния структуры рентгеновского экрана, о чем речь будет идти ниже, то резкость теневого изображения определяется главным образом размерами источника излучения и расстояния его до объекта.

Как видно из рис. 8-5, непрозрачный объект, поставленный на пути прямолинейно распространяющихся лучей, исходящих из точечного источника, образует за собой расширяющийся конус полной тени, и его силуэтное изображение на экране или пленке получает-

ся вполне резкое. В другом случае, когда источник излучения (фокусное пятно рентгеновской трубки) имеет некоторые размеры, будет наблюдаться иная картина: конус полной тени оказывается не расходящимся, а сужающимся, и помимо него за объектом появляется расширяющийся конус полутени, который уменьшает резкость изображения. Это явление называют геометрической нерезкостью.

Размеры полутени будут тем меньше, чем больше расстояние от источника излучения до объекта и чем ближе объект прилегает к экрану (рис. 8-6). Поэтому при рентгенокиносъемке всегда следует придерживаться правила: помещать объект возможно ближе к экрану и дальше от рентгеновской трубки. Вследствие удаления источника излучения облученность снизится и экран будет темнее, но изображение станет значительно резче. При этом улучшится и геометрическое подобие изображения объекту.



Рис. 8-6. Зависимость резкости теневого изображения от расстояния источника излучения до объекта (*а*) и расстояния объекта до экрана (*б*)

Флюорографическая киносъемка. Изображение на рентгеновском флуоресцирующем экране при обычном просвечивании человека имеет ничтожно малую яркость (от 0,1 до 0,01 кд/м^2), в несколько десятков тысяч раз меньшую, чем средняя яркость сцены на натуре при солнечном освещении. Киносъемку такого объекта невозможно осуществить с помощью нормальной киносъемочной технологии.

Решение проблемы киносъемки изображения, образуемого лучами Рентгена на флуоресцирующем экране, возможно двумя путями.

Первое (более раннее) направление заключается в применении модифицированного рентгеновского оборудования и специальной киноаппаратуры, оптики, кинопленки и особых способов обработки проявленной кинопленки.

Второе (новое) направление основывается на использовании возможностей электронного усиления яркости изображения и применении телевизионной техники.

Обычная флюорографическая киносъемка. Чтобы получить возможность снимать на кинопленку изображение флуоресцирующего экрана, необходимо максимально использовать приемы съемки при недостатке света, а также повысить в пределах допустимого яркость флуоресцирующего экрана, которая зависит от интенсивности падающего на него рентгеновского излучения и качества самого экрана или коэффициента выхода флуоресценции. Так как экспонирование кинопленки в киноаппарате происходит прерывисто, то целесообразно выключать эмиссию рентгеновских лучей на время, пока обтюратор киноаппарата перекрывает кадровое окно и кинопленка передвигается для экспонирования очередного кадра. Это

дает возможность увеличить мощность рентгеновской радиации и усилить свечение экрана в периоды экспонирования кинопленки, не увеличивая дозы облучения исследуемого объекта. Для прерывистого, синхронизированного с работой киноаппарата облучения объекта можно использовать свинцовый обтюратор перед выходным окном рентгеновской трубки или применить рентгеновскую трубку с дополнительным управляющим электродом, который при подаче на него отрицательного напряжения запирает эмиссию электронов, прерывая тем самым рентгеновское излучение.

Для флуорографической киносъемки нужен экран, обладающий высокой светоотдачей. Однако наиболее яркие из них флуоресци-

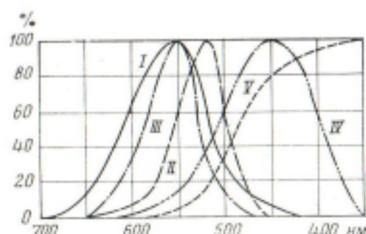


Рис. 8-7. Спектральное распределение энергии излучения различных рентгеновских флуоресцирующих экранов:
I — спектральная чувствительность глаза; *II* — экран из $ZnS+CdS$ ($+Cu$); *III* — экран из $ZnS+CdS$ ($+Ag$); *IV* — экран из $ZnSiO_2$; *V* — экран из $CdWO_4$

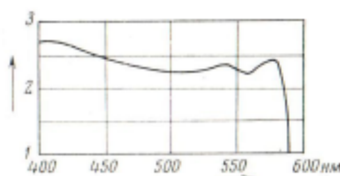


Рис. 8-8. Спектральная чувствительность кинопленки РФ

руют в зеленой или желто-зеленой области спектра (рис. 8-7). Время затухания свечения наиболее ярких экранов достаточно мало, так что послесвечение не может оказать заметного вредного влияния на изображение, снимаемое с частотой до 50 *кадр/с* и более. Разрешающая способность современных рентгеновских экранов составляет 2—3 *лин/мм*.

Кинопленка для съемки экрана, флуоресцирующего зеленым или желто-зеленым светом, должна обладать высокой чувствительностью к этой области спектра. Обычные панхроматические кинопленки не отвечают этому требованию. Необходимо использовать специальную кинопленку типа РФ, спектральная светочувствительность которой приведена на рис. 8-8. Этот тип кинопленки предназначен для съемки рентгеновских экранов, то есть для флуорографии. Кинопленка РФ обладает высокой светочувствительностью к зеленой и желто-зеленой части спектра и имеет высокий контраст.

Обработку кинопленки РФ производят в энергичном контрастно работающем проявителе.

Когда исследуемый объект имеет значительную толщину и сильно поглощает рентгеновскую радиацию, негатив может оказаться весьма тонким. В этом случае применяют усиление негатива.

При киносъемке в условиях недостатка света большое значение имеет светосила объектива. Для флуорографической киносъемки разработаны ультрасветосильные объективы. «Карл Цейсс Йена» изготовляет объективы Р-Биотар с относительным отверстием 1 : 0,85 ($f=50$ и 100 *мм*). Новая модель объектива Р-Биотар $f=100$ *мм* имеет относительное отверстие 1 : 0,73. По сравнению с объективом, имеющим относительное отверстие 1 : 2, объектив Р-Биотар 1 : 0,85 дает возможность уменьшить выдержку в 5,5 раза, а новый Р-Биотар 1 : 0,73 — в 7,5 раза. Глубина резко изображаемого пространства, получаемая при относительном отверстии объектива 1 : 0,85 или 1 : 0,73, чрезвычайно мала. Тем не менее она достаточна для съемки плоского объекта, каким является рентгеновский экран. Необходима лишь точная установка киноаппарата относительно экрана. Ультрасветосильные объективы не имеют диафрагмы и рассчитаны для работы с полным отверстием.

Имеются также ультрасветосильные объективы, изготовляемые другими фирмами, как, например, Тахон 1 : 0,95 фирмы «Астро» (ФРГ) $f=75$, 52, 35 и 25 *мм;* Анженье 1 : 0,95 фирмы «Анженье» (Франция) $f=50$ и 25 *мм*; Шнейдер 1 : 0,95 фирмы «Шнейдер» (ФРГ) $f=50$ *мм* и другие.

Специальный киносъемочный аппарат для флуорографической киносъемки имеет грейферный механизм, который продергивает кинопленку в течение $^1/_4$ цикла его работы и обеспечивает увеличение выдержки в 1,5 раза при угле раскрытия обтюратора 270°.

В последние годы появились киносъемочные аппараты с ускоренным продергиванием кинопленки. Время продергивания пленки в этих аппаратах равно около 0,002 *с*, что соответствует углу раскрытия обтюратора 343°. Такие киноаппараты предназначаются для киносъемки телевизионного экрана с фиксацией обоих полукадров. При съемке рентгеновского экрана киноаппарат с быстрым продергиванием кинопленки дает возможность снизить облученность объекта в два раза.

Применение в конструкции киноаппарата для флуорографической киносъемки какой-либо защиты от рентгеновского излучения не требуется, так как современные рентгеновские трубки хорошо экранированы и все другие элементы рентгеновского оборудования также снабжены надежными защитными устройствами.

В результате использования рассмотренных выше технических средств получаются следующие коэффициенты сокращения выдержки при флуорографической киносъемке (табл. 8-1).

Опыт подтверждает, что при использовании всех перечисленных технических средств и кратковременном повышении (в допустимых пределах) мощности рентгеновского излучения трубки удается произвести флуорографическую киносъемку одного или нескольких циклов движения какого-либо внутреннего органа человека, например сердца. Склеив снятый кусок кинопленки в кольцо, можно создать впечатление длительной работы сердца. Однако, как утверждают специалисты, для изучения циклического сокращения вообще и сердечного в частности нельзя ограничиваться съемкой небольшо-

Таблица 8-1

Технические средства	Коэффициент уменьшения выдержки
Трехэлектродная рентгеновская трубка	1,25
Флуоресцирующий экран с повышенной светоотдачей	1,5
Кинопленка типа РФ	2
Ультрасветосильный объектив 1:0,85 .	5,5
Киноаппарат с обтюратором с углом раскрытия 270°	1,5

го количества циклов, так как повторяющиеся движения далеко не однотипны. В большинстве случаев они различны, что и является предметом исследования. Поэтому обычная флюорографическая киносъемка практически не применяется для диагностики человека.

Флуорографическая киносъемка с применением электронного усиления яркости изображения. Современная техника электронного усиления яркости изображения дает возможность во много раз снизить необходимую дозу облучения просвечиваемого объекта рентгеновской радиацией и позволяет проводить флуорографическую киносъемку в условиях, близких к условиям обычного диагностического просвечивания.

Для электронного усиления яркости изображения рентгеновского флуоресцирующего экрана используются:

1) обычный электронно-оптический усилитель яркости изображения;

2) специальный электронный усилитель рентгеновского изображения (УРИ) с флуоресцирующим экраном внутри трубки;

3) всевозможные комбинации электронно-оптических усилителей яркости изображения и телевизионных систем.

Телевидение применяется при рентгеновском просвечивании не только как средство усиления яркости изображения, но также как наиболее удобный способ визуального наблюдения изображения на рентгеновском флуоресцирующем экране, не требующий затемнения помещения и адаптации глаз к темноте.

Сравнение эффективности различных способов электронного усиления яркости изображения рентгеновского флуоресцирующего экрана приведено в табл. 8-2.

Схема флуорографической киносъемки с применением электронно-оптического усилителя яркости изображения приведена на рис. 8-9. Устройство электронно-оптического усилителя яркости изображения описано в главе 11 — «Киносъемка при низкой освещенности».

В рентгенокиносъемочной установке Синеликс фирмы «Сименс» (ФРГ), изображенной на рис. 8-10, применен ультрасветосильный

Таблица 8-2

Эффективность различных способов усиления яркости изображения рентгеновского экрана

Способ усиления яркости изображения	Интенсивность облучения объекта рентгеновской радиацией, %
Обычная флуорографическая съемка	100
Электронный усилитель рентгеновского изображения (УРИ)	5,5—11
Электронно-оптический усилитель яркости изображения	5,3
Электронный усилитель рентгеновского изображения (УРИ) и телевизионная система с видиконом	3
Электронный усилитель рентгеновского изображения (УРИ) и телевизионная система с ортиконом	1,4—1,6
Электронно-оптический усилитель яркости изображения и телевизионная система с изоконом	1,2—1,4

зеркально-линзовый объектив (1 : 0,7), который образует изображение рентгеновского флуоресцирующего экрана на фотокатоде электронно-оптического усилителя яркости изображения. Усиленное электронным способом вторично уменьшенное изображение рентгеновского экрана репродуцируется с помощью двух объективов Р-Биотар 1 : 0,85 на 35-*мм* кинопленку. Раскрытие обтюратора в киноаппарате равно 270°. Частота киносъемки может достигать 50 *кадр/с*. Все элементы установки объединены в одной жесткой конструкции и тщательно отъюстированы.

В медицинских рентгенодиагностических кабинетах применяется чаще более удобный для медицинской практики усилитель яркости изображения, в котором рентгеновский флуоресцирующий экран находится внутри вакуумной трубки. Этот прибор называют УРИ (усилитель рентгеновского изображения). Его устройство показано на рис. 8-11.

Рентгеновские лучи, прошедшие через просвечиваемый объект, проходят далее через переднюю стеклянную стенку вакуумной трубки УРИ и попадают на флуоресцирующий экран, нанесенный на тонкую подложку, и вызывают на нем изображение. На другую сторону подложки напылен фотокатод, спектральная чувствительность которого соот-

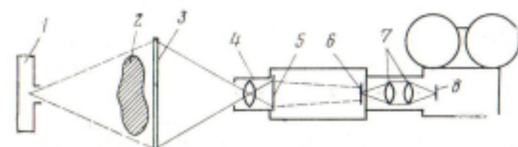


Рис. 8-9. Схема флуорографической киносъемки с электронным усилителем яркости изображения: 1 — рентгеновская трубка; 2 — просвечиваемый объект; 3 — рентгеновский флуоресцирующий экран; 4 — объектив; 5 — фотокатод электронного усилителя яркости изображения; 6 — флуоресцирующий экран электронного усилителя; 7 — репродукционные объективы; 8 — кинопленка

ветствует длинам волн флуоресцентного света. В результате фотоэлектрического эффекта вылетевшие из экрана фотоны выбивают из фотокатода электроны.

На фотокатод, управляющий и улавливающий электроды и анод, наложено электростатическое поле для ускорения электронов и получения изображения на выходном флуоресцирующем экране УРИ. Общее напряжение, равное примерно 25 *кВ*, распределяется

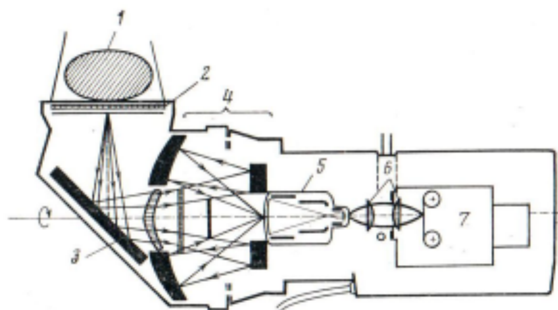


Рис. 8-10. Аппарат для флуорографической киносъемки «Синеликс»:
1 — просвечиваемый объект; *2* — рентгеновский флуоресцирующий экран; *3* — отклоняющее зеркало; *4* — ультрасветосильный зеркально-линзовый объектив; *5* — электронно-оптический усилитель яркости изображения; *6* — репродукционные объективы; *7* — киносъемочный аппарат

на четыре электрода через положительную и отрицательную части блока питания и делитель напряжения.

Изображение на выходном экране УРИ получается уменьшенным в восемь—десять раз. Усиление яркости изображения достигается за счет уменьшения изображения и ускорения электронов. Общее усиление яркости изображения может быть от 10 до 20 крат.

Разрешающая способность на экране УРИ по фотокатоду составляет 1—2 *лин/мм*.

В настоящее время имеются усилители рентгеновского изображения с разными диаметрами рабочей части фотокатода: 125, 175, 225, 275 и 300 *мм*.

Ввиду того что УРИ является однокамерным, изображение, получаемое на его выходном экране, получается перевернутое. Киносъемка изображения производится обратным ходом.

Наблюдение рентгеновского изображения на

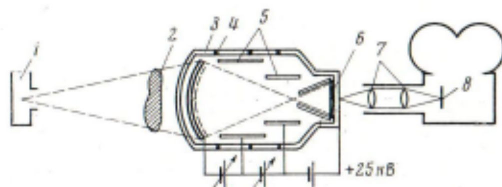


Рис. 8-11. Схема флуорографической киносъемки с помощью электронного усилителя рентгеновского изображения (УРИ):
1 — рентгеновская трубка; *2* — просвечиваемый объект; *3* — флуоресцирующий рентгеновский экран; *4* — фотокатод УРИ; *5* — аноды с делителем напряжения; *6* — флуоресцирующий экран УРИ; *7* — репродукционные объективы; *8* — кинопленка

маленьком выходном экране УРИ должно отвечать следующим условиям:

1) исследователь должен иметь возможность подойти к пациенту на такое расстояние, которое позволило бы, например, проводить пальпацию;

2) изображение на выходном экране, уменьшенное в восемь-десять раз, должно быть видимым неперевернутым и равным по величине оригиналу.

Очевидно, что лучшее решение проблемы заключается в использовании телевизионной системы. Мелкомасштабное изображение,

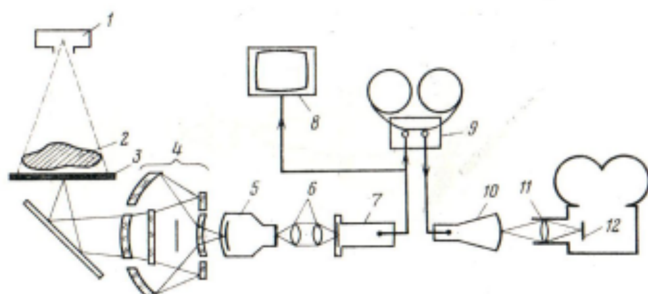


Рис. 8-12. Схема флуорографической киносъемки с помощью электронного усилителя яркости изображения и телевизионной системы с видеозаписью:
1 — рентгеновская трубка; *2* — просвечиваемый объект; *3* — рентгеновский флуоресцирующий экран; *4* — ультрасветосильный зеркально-линзовый объектив; *5* — электронный усилитель яркости изображения; *6* — репродукционные объективы; *7* — телевизионная трубка изокон; *8* — телевизор; *9* — видеомагнитофон; *10* — кинескоп; *11* — репродукционный объектив; *12* — кинопленка

которое получается на выходном экране электронного усилителя яркости, можно воспроизвести на обычном телевизионном экране. При этом можно получить еще большее усиление яркости изображения.

Рентгенокинематографическая система Делкаликс, в которой осуществлено сочетание электронно-оптического усилителя яркости изображения и телевизионной техники с видеозаписью, разработана фирмой «Олд Дельфт» (Голландия). Схема этой системы показана на рис. 8-12. Рентгеновские лучи просвечивают исследуемый объект и падают на рентгеновский флуоресцирующий экран шириной 30 *см*. Изображение рентгеновского экрана передается на фотокатод электронно-оптического усилителя яркости изображения с помощью ультрасветосильного зеркально-линзового объектива, относительное отверстие которого равно 1 : 0,7. Вторичное (усиленное по яркости) флуоресцирующее изображение передается двумя также ультрасветосильными объективами на телевизионную передающую трубку изокон и воспроизводится на экране телевизора. Одновременно может производиться видеозапись на магнитную ленту шириной 25,4 *мм*.

Телевизионная система работает с разверткой 625 строк с видеодиапазоном 8 *МГц*.

Для перевода магнитной видеозаписи на кинопленку имеется отдельное устройство, в котором смонтированы телевизионный монитор и киносъемочный аппарат для 16-*мм* кинопленки.

Пересъемка видеоизображения на кинопленку осуществляется с конверсией $^{1}/_{3}$ полукадров. Это происходит следующим образом. После экспонирования полного кадра (двух полукадров) объектив киноаппарата перекрывается, и производится протягивание кинопленки для съемки следующего кадра в течение времени воспроизведения первого полукадра второго кадра видеозаписи. Затем экспонируется второй полукадр второго кадра и первый полукадр третьего кадра видеозаписи и т. д. Таким образом, из 25 полных кадров видеозаписи получается кинофильм, как бы снятый с частотой $16^{2}/_{3}$ *кадр/с*. Разрешающая способность при этом приблизительно равна 7,5 *МГц*.

Рентгенографическая киносъемка. При рентгенографической съемке экспонирование фотопленки осуществляется непосредственно лучами Рентгена. Преимущество этого способа съемки заключается в возможности получения максимально резкого изображения.

Промежуточное включение флуоресцирующего экрана, лежащее в основе флуорографического способа, неизбежно связано с ухудшением резкости и контраста рентгеновского изображения, а следовательно, и различаемости деталей.

Флуоресцирующие вещества (люминофоры) имеют зернистую структуру и, кроме того, рассеивают свет, возбужденный рентгеновскими лучами.

Рентгенографическая киносъемка возможна только в том случае, если размеры просвечиваемого объекта не превышают формата светочувствительного материала, так как лучи Рентгена нельзя сформировать ни стеклянными, ни электромагнитными линзами. Поэтому в рентгенографических киноустановках используют кино- или фотопленку различной ширины. Когда используют широкую фотопленку, то для получения кинофильма производят пересъемку кадров рентгенографической съемки на стандартную кинопленку шириной 16 или 35 *мм*.

Для рентгенографической киносъемки мелких объектов, величина которых не превышает размеров нормального кинокадра, используется обычная кинопленка.

Имеется много биологических объектов (жучки, личинки, гусеницы, семена растений и др.), изучение функционирования внутренних органов которых весьма важно для биологов и естествоиспытателей. Такие объекты легко просвечиваются мягкими лучами Рентгена. Рентгенографическая киносъемка в мягких лучах выполняется обычным киносъемочным аппаратом (рис. 8-13).

Объектив из киноаппарата удаляется, а кадровое окно накрывается тонким желатиновым светофильтром красного цвета для

защиты светочувствительного слоя обычной несенсибилизированной кинопленки от воздействия света. Объект съемки кладут непосредственно на светофильтр и над ним устанавливают рентгеновскую трубку для получения мягких лучей. Рентгеновские лучи, выходящие через отверстие в защитном корпусе трубки, образуют на кинопленке рентгеновское изображение. Перед выходным отвер-

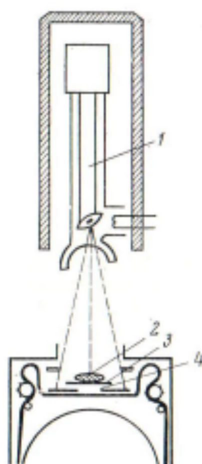


Рис. 8-13. Схема рентгенографической киносъемки мелких объектов в мягких лучах:
1 — рентгеновская трубка для получения мягких лучей; *2* — просвечиваемый объект; *3* — светофильтр; *4* — кадровое окно киноаппарата

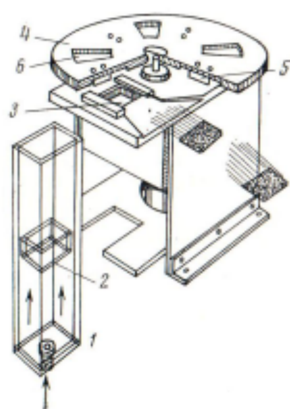


Рис. 8-14. Установка для рентгенографической киносъемки мелких объектов в лучах средней жесткости:
1 — магазинная кассета; *2* — рентгенофотопленки; *3* — экспозиционное окно; *4* — вращающийся металлический диск; *5* — планочка для сбрасывания фотопленок; *6* — экспозиционные щели

стием корпуса трубки устанавливают тонкий бериллиевый диск, который пропускает только мягкие лучи. Обтюратор киноаппарата должен быть изготовлен из стали. Дополнительной защиты от рентгеновского излучения не требуется.

Для рентгенографической киносъемки мелких объектов, для которых необходимо применение средних лучей, применяют различные устройства. На рис. 8-14 изображено устройство, которое использовалось для исследования движений черепных элементов в голове рыбы.

Вместо кинопленки здесь используются рентгенопленки размером 3×4 *см*, упакованные в обертку из пертинакса с подложенной с одной стороны фолией из свинца. Такие рентгенопленки выпускает фирма «Истмен-Кодак» для зубоврачебных целей.

Стопка рентгенопленок укладывается в магазинную кассету, в которую через нижний вентиль подается сжатый воздух, прижи-

мающий пленки к верхнему окну кассеты. Заряженная фотопленками кассета вставляется в станок против экспозиционного окна, над которым вращается металлический диск с планками, последовательно сбрасывающими фотопленки, и щелями, выполняющими роль обтюратора. Объект съемки помещается на столе (не показанном на рисунке) и просвечивается сверху рентгеновскими лучами. Рентгенографическая киносъемка может производиться с частотой до 42 *кадр/с* при выдержках $^1/_{70}$ *с*. Рентгеновская трубка с вращающимся анодом работает при напряжении 80 *кВ* и токе 100 *мА*. Расстояние между зеркалом анода трубки и пленкой равно 25 *см*. Для получения кинофильма последовательно экспонированные рентгенограммы переснимают на кинопленку.

Импульсная высокоскоростная рентгенографическая киносъемка. В технических исследованиях встречаются объекты, которые требуют для их изучения просвечивания лучами Рентгена и применения высокоскоростной киносъемки. Такими являются процессы литья и сварки металлов, замыкание контактов в масляных выключателях, работа различных закрытых механизмов, взаимодействие частей механизмов. Некоторые процессы сопровождаются ярким свечением или образованием дыма и пара, которые экранируют исследуемый объект. Заснять такие процессы можно лишь с помощью рентгеновских лучей.

В настоящее время имеется возможность осуществлять рентгенографическую киносъемку с частотой почти до 100 000 *кадр/с* при выдержках порядка 15—70 *нс*.

Короткие импульсы рентгеновского излучения получают путем разряда электрических емкостей через рентгеновскую трубку особого устройства. Серии импульсов можно создавать как с одной, так и с несколькими трубками.

Если используется несколько рентгеновских трубок, то съемка производится на неподвижные фотопленки. Рентгеновские трубки располагают против объекта по дуге, как показано на рис. 8-15. Кассеты, заряженные рентгенофотопленкой, устанавливают также по дуге с противоположной стороны. Число трубок и кассет с кинопленкой зависит от конструкции установки, габаритов трубок и кассет, она может достигать 20 штук. Срабатывание трубок происходит последовательно. В результате получают серию рентгенограмм, которые затем переснимают на нормальную кинопленку. При просмотре кинофильма на экране создается впечатление, что киносъемка произведена с движением вокруг исследуемого объекта. При рентгенографической киносъемке с помощью одной рентгеновской трубки, работающей в импульсном режиме и дающей

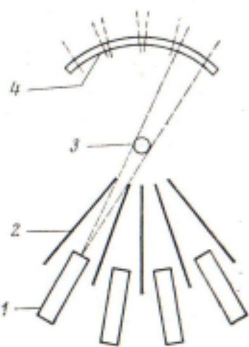


Рис. 8-15. Схема импульсной рентгенографической киносъемки несколькими трубками:
1 — рентгеновские трубки; *2* — свинцовые ширмы; *3* — просвечиваемый объект; *4* — рентгенофотопленка

последовательные вспышки рентгеновского излучения чрезвычайно короткой длительности, рентгенофотопленка непрерывно движется с помощью барабанной камеры. На рис. 8-16 изображена принципиальная схема установки для рентгенографической киносъемки с барабанной камерой.

Несмотря на то, что во время экспозиции рентгенофотопленка движется, снимки получаются резкими, так как нерезкость изображения при выдержках порядка 15—70 *нс* настолько мала, что оказывается ниже предела разрешающей способности пленки.

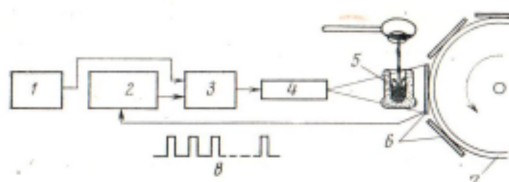


Рис. 8-16. Схема импульсной рентгенографической киносъемки с помощью одной трубки:
1 — стиловое устройство; *2* — коммутатор, управляющий включением трубки; *3* — электрические конденсаторы; *4* — импульсная рентгеновская трубка; *5* — просвечиваемый объект; *6* — рентгенофотопленка; *7* — вращающийся барабан; *8* — П-образная форма импульсов рентгеновского излучения

Импульсы рентгеновского излучения имеют П-образную форму. Разряд электрического конденсатора через трубку и возникновение импульса рентгеновского излучения происходит в тот момент, когда очередной кадр неэкспонированной пленки займет нужное положение позади просвечиваемого объекта.

Просвечивание металлических объектов производится жесткими и «чрезвычайно жесткими» рентгеновскими лучами, которые получаются при очень высоких напряжениях на трубке — от 100 000 до 2 000 000 *В*.

Рентгенографическая и бетаграфическая киносъемка. Мощные рентгеновские трубки, работающие в импульсном режиме при напряжении выше 500 000 *В* и при плотности тока порядка 1000 *А* и более на 1 *см*², имеют особую конструкцию. Антикатод такой трубки, являющийся мишенью для пучка электронных лучей и источником рентгеновской радиации, находится не внутри вакуумной

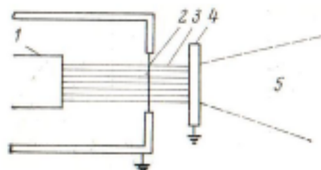


Рис. 8-17. Схема устройства мощной импульсной рентгеновской трубки:
1 — катод; *2* — выходное окно трубки; *3* — электронные лучи; *4* — вольфрамовый анод; *5* — рентгеновские лучи

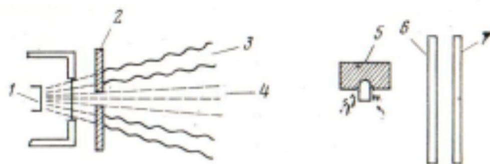


Рис. 8-18. Схема одновременной бетаграфической и рентгенографической съемки:
1 — катод рентгеновской трубки; *2* — вольфрамовый анод с отверстием в середине; *3* — рентгеновские лучи; *4* — электронные лучи; *5* — просвечиваемый объект; *6* — фотопленка, на которой регистрируется бетаграфическое изображение; *7* — рентгенофотопленка, на которой получается рентгенограмма

трубки, а снаружи ее (рис. 8-17). Внутри трубки помещается лишь электронная пушка, посылающая через прикрытое тонкой алюминиевой пластинкой окно в воздушное пространство мощный пучок электронных лучей. Вольфрамовая мишень (антикатод) при работе мощной рентгеновской трубки быстро разрушается и поэтому перед каждой серией импульсов заменяется на новую.

Пучки электронных лучей, вылетающие в воздушное пространство, способны воздействовать на расстоянии более 1 *м* на фотографический слой, чувствительный к электронным лучам, и образовывать на нем скрытое фотографическое изображение. Таким образом, имеется возможность с помощью электронных лучей получать теневое изображение объектов, лежащих на их пути. Это изображение отличается очень высоким контрастом вследствие того, что электроны сильно поглощаются молекулами воздуха.

Способ получения теневого изображения посредством электронных лучей носит название бетаграфии.

Имеется возможность получать одновременно, но на двух разных пленках, рентгеновское и бетаграфическое изображения. Для этого в вольфрамовой мишени (антикатоде) мощной рентгеновской трубки делают небольшое отверстие, через которое свободно проходят электронные лучи (рис. 8-18), которые образуют изображение на фотопленке, чувствительной к ударам электронов, но не чувствительной к рентгеновским лучам. Остальная часть электронной эмиссии, попадая на вольфрамовую мишень (антикатод), вызывает рентгеновские лучи, которые воздействуют на рентгенофотопленку, расположенную позади той, на которой образуется бетаграфическое изображение. В результате получаются два изображения: бетаграфическое и рентгенографическое. Комбинированный способ рентгенографии и бетаграфии дает возможность зафиксировать более полную картину исследуемого процесса.

Электроные лучи, сильно поглощаемые материей, образуют силуэтное изображение газообразных веществ и дымов, в том числе и дыма белого цвета. Рентгеновские же лучи, обладающие высокой проницаемостью, дают картину внутреннего строения объекта.

Глава 9

КИНОСЪЕМКА В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Свет представляет собой один из видов электромагнитных колебаний, причем колебания эти поперечные, они совершаются в направлении, перпендикулярном распространению световой волны.

Большинство природных и искусственных источников света, как тепловых, так и не тепловых, излучают свет, в котором электрические колебания совершаются в любых плоскостях, перпендикулярных направлению распространения фронта световой волны. Такой свет называют неполяризованным, или естественным. Если же колебания ограничены одной плоскостью, то свет является поляризованным. Свет, содержащий смесь поляризованных и неполяризованных лучей, называют частично поляризованным.

Поляризация света может быть линейной, круговой или эллиптической. При линейной поляризации электромагнитные колебания происходят в одном направлении — плоскости поляризации. При других видах поляризации имеет место изменение направления поляризации.

Две линейно поляризованные волны могут взаимодействовать друг с другом, когда их колебания совершаются в разных плоскостях. Так, если две одинаковые по частоте линейно поляризованные волны распространяются в одном и том же направлении, но колебания совершаются в перпендикулярных плоскостях, не имея при этом сдвига по фазе, то след пересечения результирующей волны с плоскостью, перпендикулярной направлению распространения, будет прямой линией (рис. 9-1, *а*). Свет остается поляризованным.

Когда же колебания во взаимно перпендикулярных плоскостях происходят не синхронно, а с разностью фаз в $^1/_4$ длины волны (рис. 9-1, *б*), то след пересечения результирующей волны с перпендикулярной плоскостью будет поворачиваться по часовой стрелке, оставаясь все время одинаковой длины. Волна становится поляризованной по кругу. Свет приобретает круговую поляризацию.

При других разностях фаз след пересечения результирующей волны с перпендикулярной плоскостью поворачивается, меняясь по длине. Такой свет имеет эллиптическую поляризацию.

Явления поляризации света встречаются в природе очень часто. Поляризация света происходит при отражении от неметаллических

гладких поверхностей изотропных тел, при преломлении, при рассеянии молекулами вещества в атмосфере, воде и других оптически прозрачных средах, при двойном лучепреломлении и дихроизме в кристаллах и других анизотропных веществах, а также при многих физических явлениях.

Поляризация света при отражении. Если пучок лучей естественного света падает на гладкую поверхность изотропного тела (не металлического), то отраженный свет оказывается частично или полностью поляризованным; в нем будут преобладать электромагнитные колебания, направленные перпендикулярно плоскости падения и отражения световых лучей.

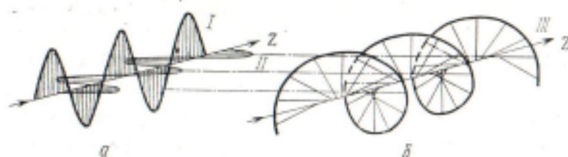


Рис. 9-1. Интерференция поляризованных волн при разных разностях хода

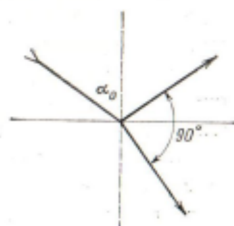


Рис. 9-2. Угол полной поляризации

Степень поляризованности отраженного света зависит от вещества, отражающего свет, и от угла падения лучей. При некотором определенном угле падения отраженные лучи будут вполне поляризованными. Этот угол называется углом полной поляризации.

Полная поляризация света при отражении наблюдается, когда угол между отраженным лучом и лучом преломленным равен 90° (рис. 9-2).

Угол полной поляризации можно вычислить аналитически (закон Брюстера) по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = n, \qquad (9\text{-}1)$$

где α_0 — угол полной поляризации; n — показатель преломления среды, при входе в которую световые лучи претерпевают преломление.

Углы полной поляризации для различных веществ

Лед	52°37'
Вода	53°07'
Глицерин	55°30'
Стекло оконное	56°20'
Стекло оптическое (кронглас)	56°42'
Стекло оптическое (флинтглас)	58°47'
Стекло органическое (плексиглас)	56°10'
Эмаль	54°30'
Полированное дерево	53°48'
Масляная краска	54°10'
Кварц	57°13'
Алмаз	67°31'

Поляризация света не происходит на поверхности металлов, как бы хорошо она ни была отполирована. Зеркала, покрытые металлическим слоем, отражают свет, также не поляризуя его. Причина заключается в том, что металлы сильно поглощают свет. Основная часть света (90% и более), падающая на гладкую поверхность металла, отражается. Та же часть, которая проходит внутрь металла, испытывает полное поглощение в тончайшем верхнем слое. Можно сказать, что в металлах нет преломленной волны. Поляризация же возникает от неодинакового распределения компонент электрического вектора между отраженной и преломленной волнами. Когда нет преломленной волны, то отраженная волна не может быть поляризована.

Итак, блестящая поверхность металла не создает поляризованного света из падающего на нее света неполяризованного. Однако было бы неверно делать из этого факта поспешный вывод, что поверхность металла не оказывает влияния и на поляризованный свет. После отражения от металла линейно поляризованный свет превращается в свет, поляризованный по кругу. Это имеет немаловажное практическое значение, о чем мы будем говорить в дальнейшем.

Поляризация света при преломлении. При падении естественного света на гладкую поверхность, разграничивающую две прозрачные среды, часть его отражается, а часть, претерпев преломление, проходит далее внутрь второй среды. Преломленные лучи света также оказываются отчасти поляризованными. Когда угол падения естественного света равен углу полной поляризации, степень поляризованности преломленных лучей будет наибольшая, однако далеко не полная (для обычного стекла около 15%). Чтобы ее увеличить, можно подвергнуть преломленные лучи второму, третьему и т. д. преломлениям. Достаточно преломлений в 8—10 наложенных друг на друга стеклянных пластинках, чтобы при падении света под углом полной поляризации не только отраженный, но и преломленный свет стал практически полностью поляризованным. Таким образом, стопка пластинок может служить поляризатором. Для разных областей спектра применяют стопки пластинок из разных материалов. Для видимой области спектра практичнее всего различные сорта стекла, для ультрафиолетовой — плавленый кварц, для инфракрасной — хлористое серебро, селен.

Поляризация света при рассеянии. Проходя сквозь атмосферу, лучи солнечного света встречают на своем пути молекулы газов и всевозможные мелкие частицы, размеры которых меньше длины световой волны. Происходящее рассеяние света в атмосфере сопровождается его частичной поляризацией. Изображенная на рис. 9-3 индикатриса показывает относительное соотношение поляризованного и неполяризованного света при рассеянии света в точке *A*.

Зачерненная часть характеризует величину поляризованного света, рассеянного в данном направлении. Как показывает индикатриса, наиболее полно поляризованные лучи распространяются

перпендикулярно направлению солнечного луча. В атмосфере степень поляризации света наибольшая под углом 90° к лучу солнечного света и составляет от 75 до 84% от всего количества света, рассеянного в данном направлении.

Поляризация света в кристаллах. Большинство прозрачных кристаллов представляет собой анизотропную среду, оптические свойства которой (скорость распространения света и коэффициент преломления) зависят от направления распространения световой волны. Оптическая анизотропия обусловлена структурой кристаллической решетки. Только кристаллы самой простой формы — кубической, — в которых межатомные расстояния одинаковы по всем трем главным осям, являются изотропными, и свет проходит через них без каких-либо изменений. Все остальные системы кристаллов: ромбическая, моноклинная, триклинная и гексагональная — обладают свойством двойного лучепреломления. В этих кристаллах естественный свет проходит без изменений только тогда, когда луч направлен вдоль оптической оси. По всем другим направлениям скорость распространения света внутри кристалла зависит от плоскости электромагнитных колебаний. Проходя через кристаллическую решетку анизотропного кристалла, свет поляризуется. А так как скорость распространения световой волны в анизотропном теле зависит от положения плоскости поляризации, то пучок естественного света расщепляется на два луча: обыкновенный и необыкновенный, которые поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

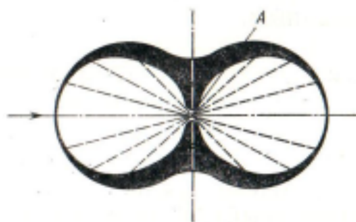


Рис. 9-3. Индикатриса рассеяния света мелкими частицами. Зачерненная часть показывает степень поляризации света в данном направлении

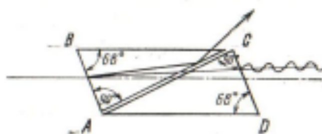


Рис. 9-4. Призма Николя

Наиболее известным и применяемым в поляризационно-оптических приборах является исландский шпат ($CaCO_3$), из кристаллов которого изготовляются призмы Николя, называемые так по имени изобретателя.

Призма Николя (или просто «николь») схематически изображена на рис. 9-4. При изготовлении призмы Николя грани *AB* и *CD* исландского шпата сошлифовываются до 68°, а сам кристалл распиливается по линии *AC* и склеивается специальным клеем — канадским бальзамом, имеющим показатель преломления $n = 1{,}55$.

Это — промежуточное значение между показателем преломления обыкновенного луча ($n=1{,}658$) и луча необыкновенного ($n=1{,}486$). На границе склеивающего слоя первый падает из более оптически плотной среды на менее плотную и при соответственно выбранном угле падения (который и предусмотрен в призме Николя) претерпевает полное внутреннее отражение и через призму не проходит, а отклоняется в сторону зачерненной боковой поверхности призмы, где и поглощается. Необыкновенный луч ни при каком угле падения не может претерпеть полного внутреннего отражения, потому что он переходит из среды менее оптически плотной в среду более плотную. Поэтому он проходит сквозь призму. Вышедший из призмы свет является линейно поляризованным.

Поляризация света при дихроизме. Дихроизм — это анизотропия поглощения, зависимость поглощения света некоторыми телами от его поляризации. Дихроизм был открыт в начале XIX века на монокристаллах турмалина. Кристалл турмалина обладает двойным преломлением, а кроме того, очень сильно поглощает один из преломленных лучей (обыкновенный). В результате этого даже тонкая пластинка турмалина, когда на нее падает естественный свет, пропускает только линейно поляризованный свет.

Дихроизм свойствен не одним кристаллам, но и многочисленным некристаллическим телам, которые обладают естественной или искусственно созданной анизотропией. Если каким-либо образом ориентировать в избранном направлении все или значительную часть молекул вещества, то появится дихроизм. В последнее время явление дихроизма, которое обнаруживают жидкие кристаллы, широко используется в технике.

Поляризационные светофильтры. Первым светофильтром, способным выделить из естественного света линейно поляризованные лучи, был монокристалл полудрагоценного минерала турмалина. Кристалл турмалина обладает двойным преломлением, а кроме того, — дихроизмом. Он очень сильно поглощает один из преломленных лучей. Если из кристалла турмалина вырезать тонкую (около 1 *мм* толщиной) пластинку с гранями, параллельными главной кристаллической оси, то сквозь такую пластинку проходит только почти вполне поляризованный свет. Недостаток турмалина заключается в том, что он является не только поляризатором (или анализатором), но одновременно еще и цветным светофильтром, пропускающим свет лишь в узкой желто-зеленой области спектра. Вследствие этого недостатка, а также по причине редкости и дороговизны монокристаллы турмалина не могли найти широкого применения, но в прошлом веке они сыграли свою роль при открытии и исследовании ряда поляризационных явлений.

В 1938 году был изобретен способ изготовления поляризационных светофильтров, получивших название поляроидов, представляющих собой анизотропные пленки, активированные анизотропными молекулами некоторых веществ или анизотропными микро-

кристаллами. Степень поляризованности естественного света поляроидами высокого качества может достигать 99%. Поляроидные пленки могут иметь большие размеры, достаточные для установки их не только перед объективом съемочной камеры, но и перед осветительными приборами.

Полимерную пленку, состоящую из весьма длинных, линейных, вытянутых макромолекул, в нагретом и размягченном состоянии подвергают сильному механическому растяжению в определенном направлении. При этом полимерные молекулы ориентируются своими длинными осями вдоль направления растяжения и пленка становится анизотропной. Если при этом в полимере растворено вещество, молекулы которого также анизотропны по форме и обладают высоким дихроизмом, то упорядоченная и ориентированная матрица микромолекул полимера, образующаяся при растяжении, ориентирует и эти примесные молекулы. Такая пленка становится поляризатором света, то есть поляроидом.

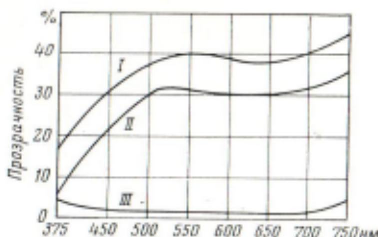


Рис. 9-5. Спектральное пропускание «Поляроида HN-42»:
I — один поляроид; *II* — два поляроида, оси которых параллельны; *III* — два поляроида, оси скрещены

Для изготовления поляроидов применяют чаще всего полимер, называемый поливиниловым спиртом. Растяжение осуществляется с помощью валов, вращающихся с разной скоростью. Для активации применяются различные вещества и разные методы активации.

Поляроиды типа Н делаются из растянутой пленки поливинилового спирта, прокрашенного йодом в насыщенном водном растворе. В пленке образуются длинные цепочки полимерных дихроичных молекул комплексного соединения поливиниловый спирт — йод. Такие поляроиды обладают хорошим пропусканием и высоким поляризующим действием в области спектра 450—750 *нм.* Однако в коротковолновой части видимого спектра степень поляризации пропускаемого света уменьшается. На рис. 9-5 приведены характеристики спектрального пропускания поляризационного светофильтра «Поляроид HN-42». Этот светофильтр пропускает 42% света. Благодаря его нейтрально-серой окраске он не вносит цветовых искажений.

Способ изготовления поляроидов типа К состоит не в присоединении, а, наоборот, в отщеплении от поливинилового спирта некоторых атомов методом каталитической гидротации. В результате часть поливинилового спирта превращается в дихроичный поливинилен, обладающий поляризующими свойствами и поглощением не только в видимой, но и в ультрафиолетовой области.

Вместо дихроичных молекул используют также и дихроичные анизотропные микрокристаллы, которые могут ориентироваться в полимерных пленках при механическом растяжении. Наиболее применяемым для этой цели веществом является герапатит (перидио-

дисульфат хинина). Его кристаллы имеют игольчатую форму, а ось наибольшего поглощения совпадает с осью иглы. При ориентации кристаллов в растягиваемой пленке, например ацетата целлюлозы происходит ориентация игл вдоль оси растяжения пленки. Электрический вектор пропускаемого таким поляроидом света будет перпендикулярен направлению растяжения. Эти поляроиды обозначаются символом J. Кроме герапатита применяются и микрокристаллы некоторых других веществ.

Круговой поляризатор. Чтобы получить круговой поляризатор, нужно на линейный поляризатор (поляроид) наклеить задерживающую пластинку «$^1/_4$ длины волны». Ось пропускания поляроида должна образовать угол 45° с оптическими осями пластинки. «Вход» кругового поляризатора находится со стороны поляроида, а «Выход» — со стороны пластинки.

Круговой поляризатор можно использовать как анализатор. Он пропустит поляризованный по кругу свет с такой же спиральностью, какую сам создает, но поглотит свет с противоположной спиральностью.

Если между двумя поляроидами, ориентированными относительно друг друга так, чтобы свет не проходил, поместить кусок обычного чистого целлофана, который употребляется, например, для обертки пищевых продуктов или цветов, то обнаружится, что свет через скрещенные поляроиды проходит.

Чтобы объяснить изменение поляризации света с помощью целлофана, следует предположить, что он меняет относительные фазы различных поляризационных компонент проходящего света.

Легко обнаружить что существуют два угла, сдвинутых на 90°, при которых действие целлофана наибольшее, и два угла с таким же сдвигом в 90°, при которых действие целлофана не сказывается. Таким образом, в целлофане существуют два взаимно перпендикулярных направления, лежащих в плоскости целлофана, которые связаны со свойством образования фазового сдвига различных поляризационных компонент света.

Не всякий прозрачный пластик обладает этим специфическим свойством, но его можно создать путем растягивания пластика. Под действием сил растяжения бессистемно расположенные органические молекулы пластика вытянутся вдоль направления силы. Таким образом, в куске пластика, у которого нет оптических осей, они создаются искусственно.

Направление растяжения пластика и перпендикулярное направление (лежащие в одной плоскости) называются оптическими осями. Из этих двух осей та ось, которой отвечает наибольший коэффициент преломления, называется медленной осью, так как больший показатель преломления означает меньшую фазовую скорость. Другая оптическая ось называется быстрой.

Слой целлофана, или пластинка, обладающий такими свойствами, называется задерживающей пластинкой.

Задерживающая пластинка не может поляризовать естественный (неполяризованный) свет. Но сложенная с поляроидом, задерживающая пластинка «$^1/_4$ длины волны» превращает линейно поляризованный свет в свет, поляризованный по кругу, и наоборот. Световая волна на выходе из задерживающей пластинки имеет одинаковые амплитуды для быстрой и медленной компонент, но быстрая компонента опережает медленную компоненту на 90°.

Устранение бликов от неметаллических гладких поверхностей. То обстоятельство, что все вещества (кроме металлов) при отражении естественного света поляризуют его, открывает большие возможности изменять характер распределения светотени при фотографировании различных объектов.

Наш глаз не способен отличить поляризованный свет от неполяризованного, но если посмотреть на окружающие нас предметы через поляризационный светофильтр, то мы обнаружим во многих случаях совершенно иное распределение светотени.

Установив поляризационный светофильтр перед объективом киносъемочной камеры и ориентировав его соответствующим образом, мы можем снимать предметы, находящиеся в воде, если угол между оптической осью объектива и водной поверхностью будет равен углу полной поляризации. Все отражения и яркие блики от поверхности воды могут быть в значительной мере устранены.

То же самое относится и к случаям съемки через иные прозрачные среды, как это имеет место при съемках аквариумов, витрин магазинов или застекленных шкафов в музеях и т. п.

Известно, какую трудность представляют съемки как застекленных, так и незастекленных картин и всевозможных полированных предметов из-за сильных бликов, скрывающих подчас самые важные детали или даже весь объект. Эти трудности могут быть частично преодолены с помощью поляризационного светофильтра перед объективом или перед осветительными приборами.

Для удаления мешающих отражений и бликов при помощи поляризационного светофильтра необходимо устанавливать кинокамеру так, чтобы оптическая ось объектива была направлена на бликующую поверхность снимаемого объекта под углом полной поляризации, как показано на рис. 9-6. Для поверхности воды угол полной поляризации равен 53°, а для оконного стекла 56°.

Вращая поляризационный светофильтр перед объективом, нужно подобрать такое его положение, при котором мешающие отражения и блики исчезают. Если кинокамера не имеет визирного устройства с матовым стеклом, то поляризационный светофильтр ориентируют путем непосредственного рассматривания через него объекта съемки. При этом необходимо, чтобы глаз кинооператора был как можно ближе к объективу кинокамеры и видел объект съемки под тем же углом, под которым он «виден» объективу. Найдя наилучшее положение светофильтра, устанавливают его на объектив кинокамеры, стремясь сохранить его ориентацию.

При съемке с поляризационным светофильтром экспозиция увеличивается от двух до шести раз, в зависимости от типа поляризационного светофильтра и особенностей снимаемого объекта. Здесь, так же как и при многих других специальных съемках, сказываются преимущества кинокамеры со встроенным экспонометрическим устройством, которое замеряет освещенность в фокальной плоскости.

Погашение отраженного света от металлических поверхностей. Блестящая поверхность металла или зеркала, накрытая круговым

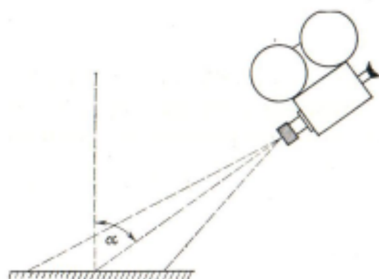


Рис. 9-6. Расположение киноаппарата для удаления бликов (α — угол полной поляризации)

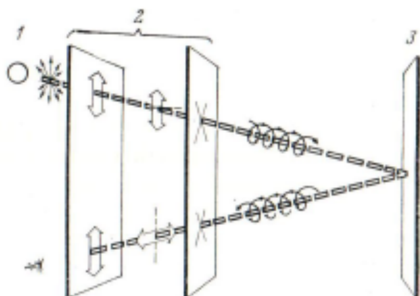


Рис. 9-7. Действие кругового поляризатора

поляризатором (линейный поляроид вверху), выглядит темной (более точно, темно-синей). Металлическая отражающая поверхность меняет направление вращения круговой поляризации света (рис. 9-7). При прохождении через поляроид *1* естественный свет становится линейно поляризованным, а проходя пластину «$^1/_4$ длины волны» *2,* приобретает круговую поляризацию. После отражения от металлической поверхности *3* левоциркулярный свет превращается в правоциркулярный (или наоборот), и тот же самый поляризатор, который создает круговую поляризацию падающего света, гасит отраженный свет. Следовательно, имеется возможность полностью погасить поляризованный свет, отраженный металлом или зеркалом, и выделить свет, который отражают поверхности неметаллические (деполяризующие свет).

Это позволяет применить способ повышения контраста изображения на экране кинескопа и других аналогичных приборов при их фотографировании или киносъемке.

Контраст изображения снижается, когда экран засвечивается посторонним светом. Но если экран кинескопа накрыть круговым поляризатором, то контраст экранного изображения значительно повышается за счет устранения света, упавшего с наружной стороны. Это происходит потому, что люминофоры не полностью деполяризуют свет, отражая до 35% поляризованного света. С помощью кругового поляризатора контраст повышается в десятки раз.

Усиление контрастности облаков на фоне голубого неба. Если в солнечный день рассматривать разные участки голубого неба через поляризационный светофильтр, вращая его, мы обнаружим, что в определенных направлениях голубое небо становится темнее. Это значит, что солнечный свет, рассеиваемый молекулами воздуха, поляризован. Область неба с наиболее полно выраженной поляризацией света находится под углом, равным примерно 90° к линии, соединяющей солнце с этой областью.

Поляризация света радуги — пример еще более эффектный, чем поляризация голубого неба. В этом нетрудно убедиться, рассматривая радугу через поляризационный светофильтр. Свет полярного сияния также является поляризованным.

Степень поляризации света в разных зонах небосвода различна (от 0 до приблизительно 80%). Свет от неба вблизи солнца не поляризован. Так же не поляризован рассеянный свет, идущий с противоположной стороны небосвода. Когда солнце находится вблизи горизонта, при восходе или закате, то наибольшая степень поляризации света голубого неба будет на большом круге, плоскость которого проходит через зенит перпендикулярно направлению на солнце. Таким образом, состояние поляризации света в различных точках небосвода зависит от положения солнца, то есть от времени дня.

Для фотографии весьма важным является то обстоятельство, что поляризация света, рассеянного облаками, всегда намного меньше, чем рассеянного ясным голубым небом. Это позволяет с помощью поляризационного светофильтра усилить контрастность облаков на фоне голубого неба. Для цветной фотографии это единственная возможность, так как желтыми и оранжевыми светофильтрами при цветной съемке воспользоваться для усиления контрастности облаков нельзя.

Следует учитывать, что большое влияние на поляризацию света неба оказывает насыщенность атмосферы водяными парами, загрязненность аэрозолями и т. п.

Если, например, в ясную погоду замечается уменьшение поляризации света голубого неба, то это указывает на то, что по небу уже идут весьма слабые, еще незаметные глазу облака, предвещающие изменение ясной погоды на пасмурную.

Состояние земной поверхности также заметно отражается на поляризации света чистого голубого неба. Так, например, снежный покров заметно ослабляет поляризацию света неба.

Итак, воспользоваться способом усиления контрастности облаков на голубом небе с помощью поляризационного светофильтра можно лишь в определенных условиях, а именно: 1) когда день ясный и воздух чист; 2) когда направление оптической оси кинокамеры перпендикулярно линии, соединяющей солнце с серединой участка неба, охватываемого кадром (рис. 9-8).

Получение эффекта плавного затемнения и высветления. Известные кинематографические приемы съемки «в затемнение», «из за-

темнения» и «наплыв» обычно выполняют путем постепенного уменьшения или увеличения экспозиции изменением угла раскрытия секторного фотозатвора (обтюратора) или постепенным закрыванием и открыванием диафрагмы объектива кинокамеры.

Аналогичные эффекты можно осуществить с помощью двух поляризационных светофильтров путем поворота одного из них относительно другого от положения «Свет» до положения «Темнота», или наоборот.

Киносъемка внутренних напряжений в фотоупругих материалах. Если в пучок лучей поляризованного света ввести предмет из прозрачного материала, оптические свойства которого могут изменяться под воздействием сжатия или растяжения, подвергнуть его нагрузке и рассматривать через второй поляризационный светофильтр (анализатор), поставленный на «темноту», то мы увидим живописную картину внутренних напряжений (рис. 9-9).



Рис. 9-8. Расположение киноаппарата по отношению к солнцу для усиления голубизны неба и выделения облаков

Явление, позволяющее сделать видимыми внутренние напряжения в материале, получило название фотоупругости. Оно основано на оптической анизотропии (двойном лучепреломлении), временно возникающей в изотропных телах вследствие деформации электронных оболочек атомов и молекул вещества, изменений ориентации участков полимерных цепей или кристаллических включений при механическом воздействии.

Плоскополяризованный луч света, попадая на прозрачный предмет, имеющий внутренние напряжения, разлагается на два луча: обыкновенный и необыкновенный. Плоскости колебаний электромагнитных (световых) волн этих лучей взаимно перпендикулярны и сдвинуты по фазе на бо́льшую или меньшую величину, в зависимости от величины напряжения и длины хода луча в исследуемом образце. Анализатор приводит колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость, в результате чего происходит интерференция света.

Поляризационно-оптический метод, основанный на явлении фотоупругости, позволяет исследовать напряжения, возникающие в механических деталях, подвергающихся во время эксплуатации нагрузкам, способным вызвать их деформацию или даже образование трещин. Этот метод применяется в машиностроении, строительном деле, производстве полимеров и пластмасс и др.

Киносъемка картины распределения внутренних напряжений в моделях различных конструкций особенно необходима, когда испытываемый объект подвергается переменным или ударным нагрузкам. В большинстве случаев требуется высокоскоростная или сверхскоростная киносъемка.

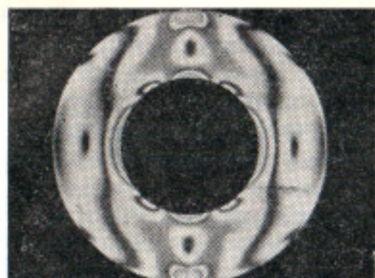




Рис. 9-9. Внутренние напряжения в прозрачном материале

Установки для изучения внутренних напряжений в материале по методу фотоупругости носят название полярископов. Принципиальная схема полярископа, оборудованного кинокамерой, изображена на рис. 9-10.

Лучи света от мощного источника света (ртутной или ксеноновой импульсной лампы) формируются конденсором в параллельный пучок. На пути пучка параллельных лучей находятся два поляризационных светофильтра (поляризатор и анализатор), а также пластины «$^1/_4$ длины волны». Объект исследования и съемки располагается в рабочем пространстве между поляризатором и анализатором. Корригированная коллективная линза превращает параллельный пучок световых лучей в сходящийся, направляя его в объектив кинокамеры, который сфокусирован на объект съемки.

Для исследования используются модели изучаемых деталей, изготовленные из прозрачного материала, в то время как технически важные материалы, например металлы и другие, непрозрачны. Однако имеются теоретические доказательства, которые подтверждены опытом, что если модель, изготовленная из другого материала, подвергается нагрузке, то возникающие напряжения в любой точке модели точно соответствуют по своему направлению и величине (с учетом коэффициента пропорциональности) напряжениям, возникающим в аналогичных точках натурной детали.

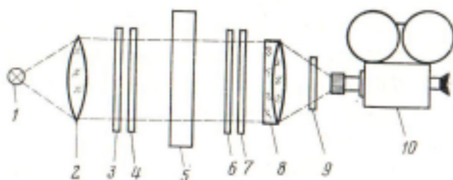


Рис. 9-10. Схема установки для съемки прозрачных моделей в поляризованном свете:
1 — источник света; *2* — конденсор; *3* — поляризатор; *4* — пластинка $^1/_4$ λ; *5* — исследуемая модель; *6* — пластинка $^1/_4$ λ; *7* — анализатор; *8* — коллектив; *9* — интерференционный светофильтр; *10* — кинокамера

Следовательно, можно, зная направление и величину напряжений, производить как качественную, так и количественную оценку без продолжительных и сложных расчетов. Полученные показатели лучше соответствуют действительности по сравнению с результатами аналитических исследований. Кроме того, аналитические методы не могут быть использованы для исследования деталей сложной формы ввиду невозможности составить уравнения.

При наблюдении нагруженной прозрачной модели в белом поляризованном свете видны черные и цветные интерференционные полосы, которые отображают распределение механических напряжений в исследуемой конструкции.

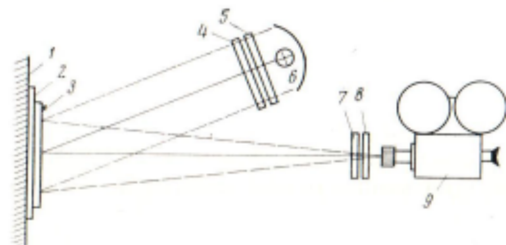


Рис. 9-11. Схема отражающей установки для съемки поверхностных напряжений в непрозрачных образцах:
1 — исследуемый объект; 2 — отражающее металлическое покрытие; 3 — фотоэластичное покрытие; 4 — пластинка $^1/_4\,\lambda$; 5 — поляризатор; 6 — источник света; 7 — пластинка $^1/_4\,\lambda$; 8 — анализатор; 9 — кинокамера

Черные полосы, называемые изоклинами, являются геометрическим местом точек, в которых направления главных напряжений постоянны и совпадают с плоскостями поляризации света. При одновременном повороте поляризатора и анализатора на угол 90° каждая точка исследуемого объекта перекрывается по крайней мере один раз изоклиной. Таким образом, представляется возможность определить направления основных напряжений в каждой точке конструкции.

Цветные интерференционные полосы, называемые изохромами, представляют геометрические места точек, в которых значение разности главных напряжений является постоянным и пропорциональным абсолютным величинам напряжений.

Коэффициент пропорциональности определяется по эталонному образцу простой формы. Этот эталонный образец подвергается нагрузке, выбранной с таким расчетом, чтобы можно было легко определить разность напряжений по классическим формулам теории сопротивления материалов. Определив коэффициент пропорциональности, находят значения напряжений в натурной детали.

При исследовании модели в поляризованном свете одновременно появляется вся сетка изохром и одна изоклина. Так как взаимное наложение их мешает наблюдению, то необходимо исключить один из видов полос.

Чтобы получить отчетливые изоклины и исключить изохромы, модель изготовляют из оптически малоактивного материала, например из плексигласа, и подвергают ее сравнительно высокой нагрузке. Применение больших нагрузок желательно в этом случае и потому, что уменьшает возможность погрешностей, возникающих от остаточных внутренних напряжений в материале, из которого изготовлена модель.

Когда же нужно исключить изоклины и выявить сетку изохром, модель следует изготовить из наиболее оптически активного материала. Если поместить за поляризатором пластинку «$^1/_4$ длины волны» ($\lambda/_4$), то линейно поляризованный свет приобретает круговую поляризацию. При этом изоклины исчезают и в поле наблюдения остаются только цветные интерференционные полосы — изохромы.

Поляризационно-оптический метод может быть применен также для обнаружения поверхностных деформаций различных натурных деталей, изготовленных из непрозрачных конструкционных материалов. Для этого на исследуемый образец наносится пластмассовое покрытие с отражающей подложкой. Благодаря адгезии, деформации покрытия повторяют деформации поверхностных слоев образца.

Фотоупругие покрытия наносятся на непрозрачные (практически любые) изделия одним из следующих способов: 1) приклеиванием тонких пластинок (толщиной 1—2 *мм*) плексигласа или эпоксидного компаунда к элементам конструкций с плоской поверхностью; 2) разбрызгиванием жидкой пластмассы по поверхности элементов конструкции с последующей полимеризацией под действием тепла; 3) приклеиванием мягкого, частично полимеризованного листа из пластмассы к поверхностям деталей простой или сложной формы с последующей полимеризацией при комнатной температуре в течение суток. Если поверхность образца не обладает достаточным отражением, то перед нанесением фотоупругого покрытия его окрашивают алюминиевой краской.

Схема отражающей установки изображена на рис. 9-11. Отраженный, дважды прошедший через фотоупругое покрытие свет исследуется с помощью анализатора. По распределению напряжений в фотоупругом покрытии можно судить о напряжениях в поверхностных слоях самого изделия.

Киносъемка кристаллов в поляризованном свете. Кристаллическая форма характерна для большинства минералов и многих органических соединений.

Двойное лучепреломление — одно из самых общих свойств кристаллов, поэтому при исследовании прозрачных кристаллов используется поляризованный свет. Главным инструментом в кристаллооптических исследованиях является поляризационный микроскоп. Он отличается от обычного биологического тем, что изучаемый объект расположен между поляризатором и анализатором, которые могут вращаться вокруг оси микроскопа независимо друг от друга, им можно придавать любое положение.

С помощью киносъемки через поляризационный микроскоп исследуют такие процессы, как образование и рост кристаллов и др.

Изображения многих препаратов, наблюдаемых в поляризованном свете, ярко окрашены. Поэтому для получения наибольшей информации об объекте производят цветную микрокиносъемку.

Освещенность изображения при микрокиносъемке в поляризованном свете, как правило, бывает низкая. Для киносъемки необходим достаточно яркий источник света.

Глава 10

КИНОСЪЕМКА ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ

Теневые методы визуализации неоднородностей в прозрачных средах основаны на изменениях величины показателя преломления, вызывающих отклонение световых лучей, проходящих через различные точки среды. Неоднородности в прозрачной среде и проявляющиеся при этом изменения показателя преломления возникают вследствие того, что плотность одного и того же вещества изменяется из-за непостоянства давления или температуры в пределах волн.

На рис. 10-1 показан путь луча света в оптически неоднородной среде. Луч света, который в однородной среде имел бы направление A и достиг экрана в точке p в момент времени t, в действительности, пройдя через оптически неоднородную среду, получит направление A' и достигнет экрана в точке p' в момент времени t' вследствие того, что скорость распространения световой волны зависит от плотности среды.

Помещая на пути лучей света соответствующую оптическую аппаратуру, мы можем зафиксировать перераспределение освещенностей на экране (или светочувствительном слое), величины отклонения световых лучей или смещения их, либо величины запаздывания световых волн по фазе. На этом основываются три метода (или три системы) визуализации неоднородностей в прозрачных средах:

1) прямой теневой метод, фиксирующий линейное смещение луча, или вторую производную показателя преломления;

2) шлирен-метод (метод Теплера), фиксирующий угловое отклонение лучей, что позволяет определить градиент плотности или первую производную показателя преломления;

3) интерференционный метод, фиксирующий разность хода двух лучей, один из которых проходит через оптическую неоднородность, а другой, — минуя ее. Этот метод дает возможность непосредственно определить показатель преломления.

На рис. 10-2 приведены два снимка модели профиля крыла самолета, обтекаемого скоростным воздушным потоком, полученные разными методами.

Поскольку теневые методы позволяют наблюдать явления, зависящие от самой плотности и различных ее производных, то эти

три метода являются дополняющими друг друга. Каждый из них обнаруживает такие особенности, которые менее ясно могут быть обнаружены другими методами.

Шлирен-метод и прямой теневой применяются для получения картины расположения и формы областей изменения плотности, появляющихся в высокоскоростных потоках, в явлениях смешивания и при свободной или вынужденной конвекции, что дает очень ценную информацию для понимания исследуемых явлений.

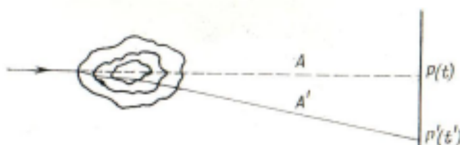


Рис. 10-1. Прохождение луча света через оптически неоднородную среду

Интерференционный метод используется главным образом для получения количественных данных. Пользуясь уравнениями газовой динамики или гидродинамики, при некоторых предположениях можно вычислить давление, скорость, температуру и число M потока.

Большое преимущество оптических методов заключается в том, что они не вносят никаких возмущений в изучаемую среду, например в поток воздуха при обтекании модели крыла самолета в аэродинамической трубе. Высокая чувствительность оптических методов дает возможность при изучении многих физических явлений получать количественные данные, которые используются для проверки теоретических положений и лежащих в их основе допущений.

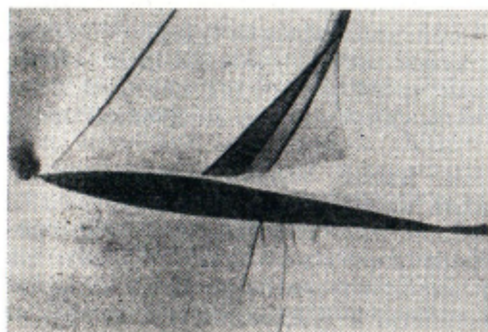




Рис. 10-2. Два снимка модели профиля крыла самолета, обтекаемого воздушным потоком, полученные разными методами

Значение киносъемки, особенно высокоскоростной, для исследований с использованием оптических методов визуализации неоднородностей в прозрачных средах заключается в том, что киносъемка дает возможность зафиксировать картину быстро протекающих и неустановившихся про-

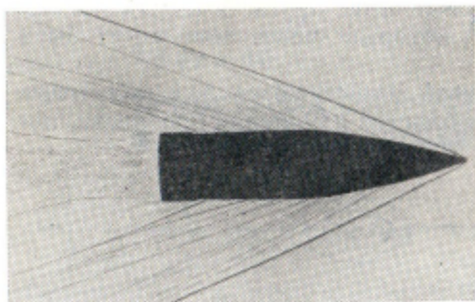


Рис. 10-3. Теневая картина летящей пули

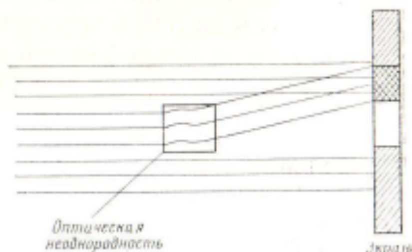


Рис. 10-4. Образование прямого теневого изображения

цессов, которые только благодаря киносъемке могут быть изучены.

Прямой теневой метод. Если строго направленный пучок световых лучей от точечного источника света отбросить на экран, то при отсутствии неоднородностей в пространстве, которое пронизывает световые лучи, экран будет засвечен равномерно. При появлении неоднородности, например при прохождении ударной волны, вызванной полетом пули, часть лучей света несколько изменит направление, и на экране возникнет теневая картина летящей пули и вызванных ее движением скачков уплотнений в воздушной среде (рис. 10-3).

Ударная волна (определенная масса воздуха, обладающая большей плотностью) будет видна на экране в виде двух полос: темной и подчеркивающей ее светлой. Рис. 10-4 поясняет, как образуется теневое изображение, обнаруживающее неоднородность в прозрачной среде, вследствие отклонения световых лучей объемами среды, имеющими иную плотность, а следовательно, и другой показатель преломления.

Для того чтобы получить резкое изображение, размеры источника света должны быть малы. Размытость изображения, вызванная конечными размерами источника света, пропорциональна диаметру светящегося кружка.

Теневое изображение может быть получено с помощью пучка строго направленного света независимо от того, будет ли это пучок параллельных, расходящихся или сходящихся лучей. Легче всего получить пучок расходящихся лучей. Для этого нужен только один точечный источник света. Чтобы сформировать параллельный или сходящийся пучок, необходим оптический элемент: коррегированная линза или вогнутое параболическое зеркало, свободные от сферической и хроматической аберраций.

Прямой теневой метод применяют для визуализации больших градиентов изменения плотности среды, вызванных полетом тел со сверхзвуковой скоростью или конвекционными потоками газов или жидкостей.

Шлирен-метод Теплера. Наиболее распространенный метод визуализации оптических неоднородностей в прозрачных средах получил название шлирен-метода Теплера. Это название дано по имени немецкого ученого А. Теплера, который в 1864 году впервые опубликовал работу, в которой указал на возможность использования метода «ножа» Фуко для исследования неоднородностей в прозрачных средах. Метод «ножа» был изобретен известным французским физиком Л. Фуко, применявшим его начиная с 1856 года для проверки точности шлифовки оптических поверхностей при изготовлении телескопов. В литературе до сего времени нет единообразия в наименовании этого метода. Его называют шлирен-методом*, методом свилей, методом полос и методом стриоскопии.

Сущность шлирен-метода станет понятной с помощью рис. 10-5. Свет от точечного источника *1* или источника с прямолинейной нитью (расположенной перпендикулярно плоскости рисунка) фокусируется с помощью конденсорной линзы *2* на точечную или щелевую диафрагму *3* таким образом, чтобы последняя была равномерно освещена. Прошедший сквозь диафрагму свет фокусируется с помощью длиннофокусного, имеющего большой диаметр объектива *4* на кромку «ножа» Фуко *5*, представляющего собой непрозрачную шторку с острым краем. При этом «нож» должен быть расположен точно в фокальной плоскости и строго параллельно изображению щелевой диафрагмы. Если в исследуемом (рабочем) пространстве *Н* на пути лучей света отсутствуют неоднородности (градиенты показателя преломления) и при условии, что объектив обладает высокими оптическими качествами и хорошо коррегирован в отношении сферической и хроматической аберраций, то при передвижении «ножа» в направлении, указанном стрелкой, доступ света к объективу приемной части *6* и далее к экрану *7* (или светочувствительному слою кинопленки) прекратится в момент, когда «нож» полностью перекроет изображение диафрагмы.

При появлении неоднородности в исследуемом пространстве *Н* некоторые лучи света будут отклонены вверх, вниз или в стороны. Те из них, которые отклонятся вверх, пройдут над «ножом», попадут в объектив съемочной камеры и образуют шлирное изображение на пленке *7*. В этом случае лучи, которые, проходя неоднородность, отклоняются вниз, вправо и влево, в объектив камеры не попадут, благодаря чему и образуется это теневое изображение.

Для выявления неоднородностей, в которых лучи отклоняются вниз, кромку «ножа» устанавливают так, чтобы она перекрывала изображение диафрагмы неполностью. Выявление неоднородностей, отклоняющих лучи света влево или вправо, может быть получено поворотом всей системы (источника света с диафрагмой и «ножа») на угол 90° или применением различной формы диафрагмы *3* и «ножа» *5*. Ели диафрагма имеет вид щели, то в качестве «ножа» могут быть использованы щель, нить в центре изображения

---

* Schliere — неоднородность, свиль в оптическом стекле (*нем.*).

щелевой диафрагмы, нить, смещенная от центра изображения диафрагмы, расфокусированная нить, решетка и т. д.

Когда «нож» неполностью перекрывает изображение диафрагмы и часть пучка света проходит над краем «ножа», тогда шлирная картина будет более светлой.

Если «нож» установлен неточно в фокальной плоскости, то поле изображения в съемочной камере будет освещено неравномерно — оно будет светлее к одной стороне и темнее к другой.

К качеству оптической системы Теплера предъявляются весьма строгие требования. Само стекло не должно иметь неоднородностей,

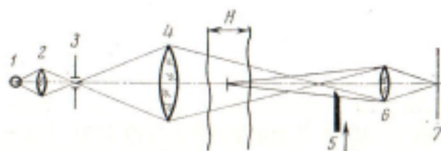


Рис. 10-5. Схема шлирен-метода Теплера

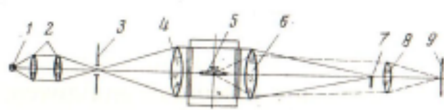


Рис. 10-6. Оптическая схема шлирен-системы Теплера с параллельным ходом световых лучей через исследуемое пространство: *1* — источник света с прямолинейной нитью; *2* — оптическая система осветителя; *3* — щелевая диафрагма; *4* — первая линза (объектив большого диаметра), образующая параллельный пучок световых лучей; *5* — исследуемое пространство (рабочая часть); *6* — вторая линза (объектив большого диаметра); *7* — «нож» Фуко; *8* — объектив; *9* — фокальная плоскость киноаппарата

свилей, пузырьков. Это требование чрезвычайно трудно выполнить при отборе слитков стекла для изготовления линз большого диаметра. Поверхности линз должны быть очень точно отшлифованы и отполированы. Сферическая аберрация должна быть устранена настолько, чтобы края объектива давали такую же освещенность в поле изображения, как и середина. Хроматическая аберрация также должна быть устранена. Астигматические ошибки, кома и искривление поля изображения, наоборот, мало влияют на качество теневой и шлирной картины.

Простые двояковыпуклые линзы непригодны для использования в оптической системе шлирен-метода Теплера. Поэтому используют хорошо корригированные длиннофокусные объективы, изготовленные для телескопов, предназначаемых для астрономических наблюдений. Коррекцию их можно еще больше улучшить, если расположить два одинаковых объектива таким образом, чтобы между ними был параллельный ход лучей, как показано на рис. 10-6.

В современных шлирен-системах Теплера вместо линз чаще используют вогнутые зеркала с поверхностным серебрением, так как они свободны от хроматической аберрации, а неоднородности в толще стекла не могут оказывать влияния на оптические свойства их зеркальной поверхности. Кроме того, зеркала могут быть изготовлены значительно большего диаметра, нежели линзы. На рис.

10-7 изображена оптическая схема зеркальной шлирен-системы Теплера.

В Советском Союзе выпускаются приборы Теплера трех типов: зеркально-менисковый (ИАБ-451), зеркально-линзовый (ТЕ-21) и зеркальный (ТЕ-19). Наиболее широкое распространение получил прибор ИАБ-451, оптическая схема которого изображена на рис. 10-8.

Прибор ИАБ-451 состоит из двух зеркально-менисковых объективов с $f=1917$ *мм*, осветительной системой с щелевой диафрагмой

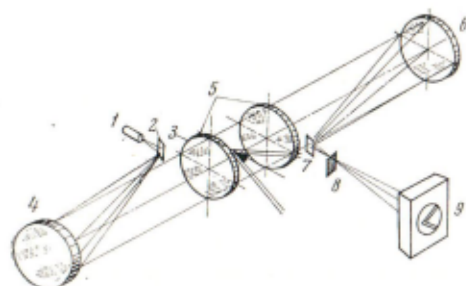


Рис. 10-7. Шлирен-система с вогнутыми зеркалами:
1 — осветительная система; 2 — щелевая диафрагма; 3 — отклоняющее зеркало; 4 — первое вогнутое зеркало, формирующее параллельный пучок лучей света; 5 — ограниченное плоскими оптическими стеклами исследуемое (рабочее) пространство; 6 — второе вогнутое зеркало; 7 — отклоняющее зеркало; 8 — «нож» Фуко; 9 — экран, на котором образуется теневое изображение

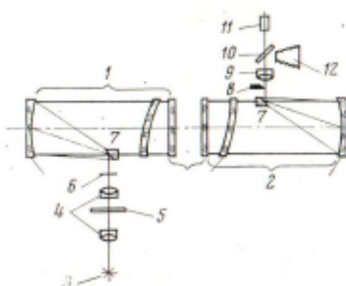


Рис. 10-8. Оптическая схема зеркально-менисковой системы ИАБ-451:
1 — первый зеркально-менисковый объектив; 2 — второй зеркально-менисковый объектив; 3 — источник света; 4 — конденсор осветительной системы; 5 — щелевая диафрагма; 6 — светофильтр; 7 — отклоняющее зеркало; 8 — «нож» Фуко; 9 — линзы, фокусирующие изображение; 10 — полупрозрачное зеркало; 11 — визирная трубка; 12 — киноаппарат

и приемной части с «ножом» Фуко. Диаметр наблюдаемого поля равен 230 *мм*.

Для фокусирования лучей от источника света в плоскости щели служит двухлинзовый конденсор. Щелевая диафрагма состоит из двух шторок, раздвигаемых в разные стороны от оптической оси с помощью микрометрических винтов. Длина щели регулируется в пределах от 0,2 до 12 *мм*, а ширина — от 0 до 3 *мм*. Вместо щелевой диафрагмы можно устанавливать щитки с круглыми отверстиями разных диаметров. В пучок лучей, формируемый конденсором, можно вводить светофильтры из цветного стекла (желтый, желто-зеленый и красный), которые укреплены на вращающемся барабане.

В приемной части имеется каретка с «ножом» Фуко, окулярная трубка для наблюдения шлирного изображения и приставки для фото- и кинокамер. «Нож» можно перемещать вдоль оптической оси в пределах 50 *мм* с точностью до 0,1 *мм*, а поперек оптической оси — на 25 *мм* с точностью до 0,01 *мм*. Кроме того, можно поворачивать «нож» на 360° с точностью до 6′. Вместо «ножа» Фуко в ходе лучей может быть установлена нить, решетка и т. п.

Имеются две фотоприставки, которые дают изображения в виде кругов диаметром 24 и 80 *мм*. Специальный объектив позволяет присоединить к оптической системе киносъемочную камеру.

Прибор ТЕ-21 зеркально-линзового типа. Его коллиматорные объективы состоят из двух сферических зеркал и двух корригирующих линз. Фокусное расстояние объективов 4424 *мм*. Диаметр наблюдаемого поля 400 *мм*.

Прибор ТЕ-19 зеркального типа состоит из двух вогнутых зеркал и двухлинзового конденсора, исправляющего остаточные аберрации зеркал. Фокусное расстояние 1500 *мм*. Диаметр наблюдаемого поля 150 *мм*.

Способы получения цветного изображения. Несложные видоизменения прибора Теплера позволяют получить многоцветное изображение, в котором каждый цветовой тон соответствует определенному градиенту плотности в картине распределения неоднородностей прозрачной среды.

Цветное изображение более наглядно и привлекательно, что особенно важно для учебных кинофильмов. Цвет облегчает наблюдение особенностей изучаемых явлений и процессов, так как глаз более чувствителен к цветовому контрасту, чем к контрасту серых плотностей.

Наиболее простой способ получения цветного изображения на приборе Теплера заключается в установке в фокальной плоскости приемной части шлирен-системы, вместо «ножа» Фуко светофильтра, состоящего из параллельных полос разного цвета, например синего, зеленого и красного. Если при отсутствии неоднородности в рабочем пространстве изображение щели осветителя сфокусировать на среднюю (зеленую) узкую полоску светофильтра, то лучи света, отклоняющиеся при прохождении оптических неоднородностей, будут приходиться на соседние полосы других цветов (синего и красного), давая на экране разноцветное изображение.

Другой способ основан на разложении узкого пучка белого света, прошедшего сквозь щелевую диафрагму осветителя, в спектр. Тогда в фокальной плоскости приемной части прибора Теплера образуется изображение спектра. Если установить в приемной части прибора вместо «ножа» узкую щель и вырезать часть спектра, то, пока среда в рабочей части однородна, поле наблюдения будет окрашено в один какой-то цвет. При появлении в исследуемом пространстве неоднородности часть спектра сместится и через щель пройдет свет другой окраски. Цветную картину на приборе ИАБ-451 получают с помощью приставки к осветительной части прибора, которая состоит из двух призм прямого зрения, которые разлагают пучок белого света в спектр. При вращении призм вокруг оптической оси в противоположные стороны происходит изменение ширины спектра.

Соединение прибора Теплера с кинокамерой. Простейший способ соединения теневой (шлирной) оптической системы с кино-

съемочной камерой следующий. Объектив кинокамеры должен быть расположен вблизи зрачка прибора Теплера (находящегося в плоскости «ножа» Фуко) так, чтобы весь пучок световых лучей, выходящих из прибора, охватывался входным зрачком объектива кинокамеры. Почти все объективы из обычного комплекта кинокамеры обеспечивают как охват пучка световых лучей в системе, так и фокусирование на кинопленке объекта съемки исследуемого в рабочем пространстве прибора Теплера. Таким образом, для совместной работы прибора Теплера и обычной кинокамеры, а также скоростной кинокамеры СКС-1 не требуется никаких дополнительных оптических систем. Масштаб изображения объекта зависит от фокусного расстояния объектива кинокамеры. Получение изображения нужного масштаба достигается сменой объективов. Чем больше фокусное расстояние объектива, тем крупнее будет изображение объекта на пленке в кинокамере.

Для соединения прибора Теплера со сверхскоростными кинокамерами СФР или ФП-22 необходимо между выходным зрачком шлирной оптической системы и кинокамерой ввести дополнительную оптику. Назначение этой дополнительной оптической системы состоит в том, чтобы совместить выходной зрачок прибора Теплера и входной зрачок кинокамеры, а также обеспечить необходимый масштаб изображения объекта съемки на пленке. Из дополнительной оптической системы лучи выходят параллельным пучком и дают на пленке в сверхскоростной кинокамере, сфокусированной на бесконечность, изображение объекта исследования.

Источники света для съемки теневыми методами. Наиболее существенными свойствами источника света, применяемого для съемки прямым теневым методом или по шлирен-методу, являются малые размеры его светящегося тела и большая яркость. В случаях вспышек — их длительность и частота повторения, а также стабильность свечения в течение времени съемки. Спектральные свойства света в большинстве случаев не имеют большого значения.

Выбор источника света зависит от особенностей изучаемого явления или процесса. Для съемки процессов, протекающих с малыми скоростями, используют источник света непрерывного свечения: лампы накаливания, ртутные и ксеноновые лампы. Эти лампы могут кратковременно работать в форсированном режиме, когда их яркость повышается в несколько раз.

Для нормальной киносъемки обычной 35-*мм* кинокамерой, а также для высокоскоростной киносъемки 16- и 8-*мм* кинокамерами типа СКС-1 или «Пентацет-16» вследствие очень малых размеров изображения часто не требуется яркого источника света. Яркий источник света необходим для сверхскоростной киносъемки, и тогда бывает нужно использовать импульсные лампы с увеличенной длительностью вспышки, дающие равномерное свечение в течение всего периода съемки (обычно от 8 до 20 *мс*), или искровые источники света.

Иногда удобно использовать многократно-импульсный источник света, синхронизированный с движением кинопленки в съемочной камере.

Прибор ИАБ-451 обычно комплектуется лампой накаливания и ртутной лампой сверхвысокого давления СВдШ-250-3.

Выбор кинопленки для съемки теневых картин. Основная характерная особенность изображения, получаемого как простым теневым методом, так и шлирен-методом Теплера, — это относительно малая контрастность. Интервал яркостей как в простом теневом, так и шлирном изображении редко бывает более 1 : 10. Если экспозиция такой картины приходится на прямолинейный участок характеристической кривой фотографического материала, то можно считать, что все типы кинопленки, применяемые для обычных киносъемок, пригодны также и для съемки теневого изображения.

Однако при съемке с очень короткими выдержками и недостаточно ярком источнике света экспозиция часто приходится на нижний участок характеристической кривой (область недодержек). Этого следует избегать. Наоборот, нужно стремиться усилить контраст изображения теневой картины, чтобы сделать заметными такие детали, которые не видны при непосредственном рассматривании шлирного изображения, применяя, например, более длительное проявление кинопленки до более высокого значения γ.

Цветные изображения, получаемые по шлирен-методу Теплера, имеют такую же контрастность, что и соответствующие черно-белые. Что касается вопроса цветовоспроизведения, то поскольку естественных стандартов цветного шлирного изображения нет, обычно требуется получить лишь достаточное разнообразие цветовых тонов и высокую их насыщенность. Точная цветопередача здесь не имеет значения еще и потому, что цветное шлирное изображение обычно служит исключительно для получения качественной картины исследуемого процесса, но не количественного анализа.

Таким образом, для съемки цветной шлирной картины можно применять любые цветные многослойные кинопленки, не проявляя особой заботы о точности цветового баланса. Повышенный контраст и насыщенный цвет всегда желателен, чтобы получить локальные цветовые тона. Требования к экспонированию цветной кинопленки остаются теми же, что и для черно-белой пленки.

Интерференционный метод. Получение и съемка интерференционной картины оптических неоднородностей в прозрачных средах осуществляются с помощью приборов, называемых интерферометрами, которые основаны на разделении пучка световых лучей на два когерентных пучка и соединении их снова в один пучок после прохождения каждым из них по своему тракту. Так как когерентные волны способны интерферировать, то в случае образования разности фаз волновых колебаний в двух пучках на экране возникают интерференционные полосы.

Разделение и воссоединение интерферирующих пучков световых лучей производится различными способами: с помощью зеркальных систем, оптических элементов из двулучепреломляющих кристаллов или дифракционным методом.

На рис. 10-9 изображена оптическая схема двухлучевого интерферометра Маха-Цандера, в котором разделение пучков и их ре-

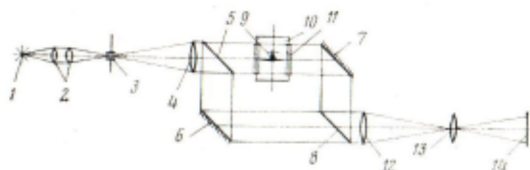


Рис. 10-9. Оптическая схема двухлучевого интерферометра:
1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — щелевая диафрагма; 4 — объектив коллиматора; 5, 8 — полупрозрачные пластины; 6, 7 — зеркала; 9 — исследуемая модель; 10 — исследуемое пространство; 11 — защитные оптические стекла; 12 — объектив приемной части прибора; 13 — объектив киноаппарата; 14 — кинопленка

комбинация достигаются при помощи зеркал и полуотражающих пластин.

Если оптическая длина пути обоих пучков одинакова, экран будет освещен равномерно. Но если после разделения света на два когерентных пучка они будут распространяться в средах с различной плотностью, то между световыми волнами образуется разность

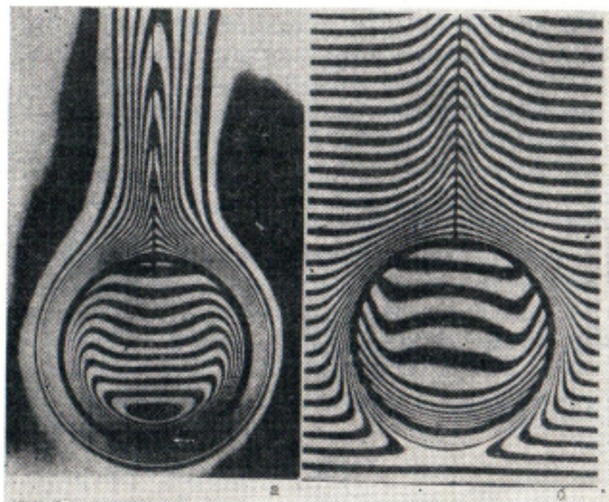


Рис. 10-10. Интерференционная картина температурного поля от нагретого полного цилиндра:
а — при начале нагрева и естественной конвекции воздуха;
б — при дальнейшем нагревании окружающей среды

фаз и на экране возникает интерференционная картина, состоящая из полос равной ширины или равного наклона (рис. 10-10). По направлению и смещению полос определяют качественную картину и количественные данные о прозрачной среде в исследуемом пространстве, где показатель преломления по каким-либо причинам менялся.

Оптические системы для получения интерференционной картины неоднородностей в прозрачных средах весьма разнообразны. Интерференционную картину можно получить и на приборах Теплера с помощью дополнительных приставок.

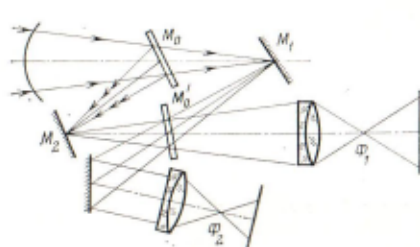


Рис. 10-11. Оптическая схема интерференционной приставки РП-452 к теневому прибору ИАБ-451:
$Ф_1$ и $Ф_2$ — фото- или кинокамеры для съемки интерференционной картины

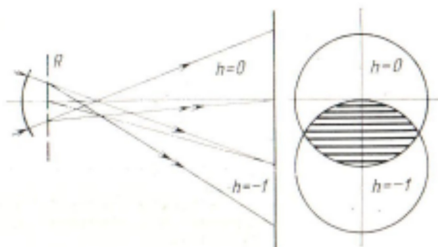


Рис. 10-12. Оптическая схема интерференционной приставки с дифракционными решетками к прибору ИАБ-451

Выпускается два типа интерференционных приставок к прибору ИАБ-451. На рис. 10-11 изображена оптическая схема интерференционной приставки РП-452.

Сходящийся световой пучок, поступающий из прибора ИАБ-451, делится полупрозрачной пластинкой M_0 на два когерентных пучка, которые, отражаясь от зеркал M_1 и M_2, интерферируют между собой по обе стороны полупрозрачной пластинки M'_0. Интерференционная картина может фотографироваться в белом или монохроматическом свете с визуальным контролем за исследуемым объектом.

Другая приставка позволяет преобразовать прибор ИАБ-451 в дифракционный интерферометр (интерферометр сдвига с постоянной величиной сдвига волновых фронтов). С этой целью вместо «ножа» Фуко устанавливается дифракционная решетка. Если на решетку R (рис. 10-12) падает сферический волновой фронт, то за решеткой образуется несколько когерентных волновых фронтов с дифракционными макси-

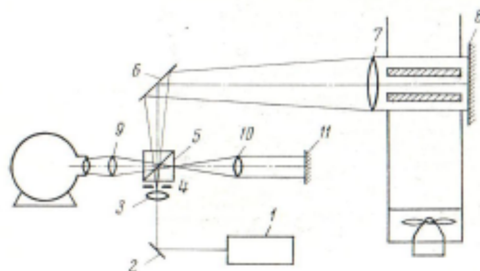


Рис. 10-13. Схема установки для киносъемки интерференционной картины температурного поля в теплообменном устройстве

мумами 0±1, 0±2 и т. д. порядков (на рисунке показаны 0-й и 1-й порядки: $h=0$ и $h=-1$). В области наложения волновых фронтов возникает интерференционная картина. В зависимости от периода и профиля штрихов дифракционной решетки можно получить двухлучевую или трехлучевую интерференционную картину. Ширина интерференционного поля в двухлучевом варианте равна 110 *мм*, в трехлучевом — 75 *мм*.

Интерференционный метод наблюдения и исследования неоднородностей в прозрачных средах находит широкое и разнообразное применение. Часты случаи, когда типовая аппаратура не может быть использована. Поэтому для таких экспериментальных работ создаются уникальные установки. Приводим описание одной из них.

Трубчатые теплообменные устройства являются одним из важных элементов в машиностроительной технике. Визуализация воздушных потоков и температурных полей между элементами теплообменного устройства осуществляется интерферометрическим методом, который дает возможность наблюдать картину тепловых потоков и получать количественные данные.

Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу диаметром 250 *мм*, в рабочей части которой размещены перпендикулярно потоку медные трубки с встроенными внутри них электрическими нагревателями. Наблюдение за процессом и киносъемка ведется через круглое застекленное окно диаметром 160 *мм*. Схема интерференционной установки показана на рис. 10-13.

Параллельный пучок света, излучаемый лазером *1*, направляется зеркалом *2* к линзе *3*, которая превращает его в расходящийся пучок. После прохождения диафрагмы *4* лучи света поступают в светоделительную призму *5*. Прошедшая в прямом направлении часть когерентного пучка отклоняется зеркалом *6* в объектив *7*, формирующий широкий параллельный пучок и направляющий его в окно рабочей части аэродинамической трубы. Плоское зеркало *8*, расположенное за противоположным окном, посылает параллельный пучок лучей света в обратом направлении через объектив *7* и отклоняющее зеркало *6* в светоделительную призму *5*, которая отклоняет его теперь в сторону объектива киносъемочной камеры *9*. Опорный пучок когерентных лучей света от того же источника — лазера — поступает через светоделительную призму *5*, объектив *10* после отражения от плоского зеркала *11* и в обратном направлении через объектив *10*, светоделительную призму *5* в объектив камеры *9*. Таким образом, в фокальной плоскости кинокамеры два когерентных пучка световых лучей интерферируют, образуя интерференционную картину неоднородностей в рабочем пространстве аэродинамической трубы.

Глава 11

КИНОСЪЕМКА ПРИ НИЗКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

Современная кинотехника успешно преодолевает трудности, вызываемые недостаточным освещением, и постепенно расширяет возможности выполнения киносъемок при низкой и очень низкой (почти граничащей с темнотой) освещенности.

Последнее десятилетие ознаменовалось большим прогрессом в изготовлении высокочувствительных кинопленок. Ставшие уже обычными высокочувствительные черно-белые кинопленки обладают светочувствительностью 500 ед. ГОСТ. Это позволяет производить киносъемку при освещенности всего около 20 *лк*, если светосила объектива 1 : 2, а экспозиция равна $^1/_{50}$ *с*.

Так называемые сверхчувствительные кинопленки (например, кинопленка тип 29) имеют светочувствительность около 5000 ед. ГОСТ. Освещенность снимаемых объектов при тех же параметрах киносъемки должна быть всего 2 *лк*. Такая кинопленка дает возможность производить нормальную киносъемку в условиях глубоких сумерек. Общим недостатком всех сверхчувствительных кинопленок является высокая зернистость эмульсионного слоя.

Достигнутая светочувствительность кинопленки еще недостаточна для киносъемок ночью при свете луны и звезд или в безлунную ночь при свете неба, а также в очень темных помещениях, в шахтах или на большой глубине под водой, где освещенность составляет сотые или тысячные доли люкса. Для того чтобы стало возможным производить киносъемку в любых условиях, встречающихся в природе, необходимо повысить чувствительность светоприемника в десятки тысяч раз.

Решение проблемы киносъемок при очень низких уровнях освещенности возможно разными методами.

Одни методы основаны на полном использовании возможностей традиционных фотографических средств, таких, как увеличение светочувствительности кинопленки способами гиперсенсибилизации и латенсификации или способами особой химико-фотографической обработки (активное проявление и усиление проявленного изображения), а также повышением эффективности использования оптики и кинокамеры.

Другие методы используют возможности электронной оптики. Перспективность электронно-оптических методов усиления яркости изображения вытекает из того факта, что процесс преобразования света в фотоэлектроны в 100 раз более эффективен, чем аналогичный процесс преобразования фотонов в зерна серебра в светочувствительном слое кинопленки. Энергия фотоэлектронов может быть усилена во много тысяч раз.

Продленное проявление. Существенное повышение светочувствительности кинопленки может быть достигнуто путем увеличения продолжительности проявления в два, три и более раз. Пригодны большинство мелкозернистых выравнивающих проявителей, работающих медленно, как, например, проявитель Д-76. При длительном проявлении повышается контраст нижнего участка характеристической кривой кинопленки, но одновременно повышается и контраст всего негатива. Следовательно, этот метод можно использовать только в случаях, когда интервал яркостей объекта съемки небольшой. Повышение светочувствительности сопровождается увеличением вуали и зернистости проявленного изображения.

Гиперсенсибилизация и латенсификация. Гиперсенсибилизацией называют методы повышения светочувствительности кинопленки перед ее экспонированием, а латенсификацией — методы усиления скрытого изображения или увеличения его способности к проявлению после экспонирования, перед проявлением. Гиперсенсибилизацию и латенсификацию можно осуществить химическими или физическими методами.

Гиперсенсибилизация купанием в щелочном растворе. Неэкспонированная кинопленка купается в 4%-ном растворе аммиака (уд. вес 0,88) или в 0,5%-ном водном растворе триэтаноламина в течение 2 *мин* при температуре 13°С. После купания избыток раствора удаляется отжимом с помощью вискозной губки. Кинопленка как можно быстрее высушивается при нормальной комнатной температуре. Лучший результат достигается, когда концентрация сенсибилизирующего вещества и время обработки вызывают двойное увеличение вуали.

Обработка при низкой температуре рекомендуется для того, чтобы уменьшить набухание эмульсионного слоя кинопленки и обеспечить быструю сушку.

Кинопленка, обработанная таким способом, должна быть использована как можно быстрее, так как ее светочувствительность быстро снижается и примерно через месяц пропадает совсем.

Латенсификация купанием. Повышение светочувствительности экспонированной кинопленки почти вдвое достигается путем обра-

ботки в течение 5 *мин* при температуре +20°С в растворе следующего состава:

Вода	1 *л*
Метабисульфит калия	5 *г*
Сульфит натрия	8,5 *г*

pH = 6,0

С кинопленки нужно удалить капли и быстро высушить ее при нормальной комнатной температуре. Когда кинопленка высушена, ее проявляют обычным способом. Плотность вуали после такой обработки значительно выше и зерно крупнее.

Гиперсенсибилизация парами ртути. Ролик неэкспонированной кинопленки, завернутый в светонепроницаемую бумагу, намотанный на неметаллическую бобину, помещают в герметически закрываемый контейнер, в котором имеется капля ртути величиной с горошину. В качестве контейнера лучше использовать химический эксикатор с притертой крышкой.

Пары ртути проникают между витками кинопленки и воздействуют на эмульсионный слой, вызывая повышение светочувствительности (в зависимости от типа кинопленки) в полтора-два раза.

Однако этот способ весьма неустойчив и необходимы предварительные пробы. Для разных типов кинопленки нужно определить оптимальное время обработки, температуру, влажность и т. д.

Пробные кусочки кинопленки помещают в эксикатор с ртутью и вынимают по одному через разные промежутки времени, например через 2, 4, 8, 16 или 32 *ч*. Температура может быть нормальная комнатная. С повышением температуры продолжительность обработки сокращается. Пробные кусочки кинопленки подвергают сенситометрическим испытаниям и выбирают оптимальный режим проведения процесса гиперсенсибилизации данного типа кинопленки.

Гиперсенсибилизированная парами ртути кинопленка должна быть использована по возможности быстрее, так как светочувствительность ее быстро понижается, а вуаль возрастает.

Латенсификация парами ртути. Этот процесс проводится так же, как и гиперсенсибилизация парами ртути, но уже после съемки. Так же необходимо путем проб определить режим, при котором достигается максимальное повышение светочувствительности кинопленки.

Гиперсенсибилизация светом. Общая засветка неэкспонированной кинопленки очень слабым светом в течение 20—30 *мин*, способным вызвать оптическую плотность после проявления не более 0,2—0,3 над плотностью «химической» вуали эмульсии, может повысить эффективную светочувствительность в полтора-два раза. При этом эффект такой предварительной длительной засветки очень слабым светом практически не зависит от спектрального состава света. Однако предпочтительнее использовать длинноволновые лучи, так как они более глубоко проникают в эмульсионный

слой. Увеличение светочувствительности тем больше, чем длительнее время воздействия слабого света.

Гиперсенсибилизация светом изменяет вид характеристической кривой, которая становится более пологой вследствие того, что эффект предварительной засветки проявляется только в области малых экспозиций на нижнем участке. В средней части характеристической кривой (области правильных экспозиций) увеличение светочувствительности не наблюдается.

Степень увеличения светочувствительности зависит от типа кинопленки. На более высокочувствительных кинопленках эффект гиперсенсибилизации меньше. Зернистость эмульсионного слоя при методе гиперсенсибилизации светом не изменяется.

Латенсификация светом. Повышение эффективной светочувствительности может быть получено также и после экспонирования кинопленки в кинокамере, если подвергнуть кинопленку латенсификации светом. Общая засветка кинопленки слабым светом осуществляется так же, как и при гиперсенсибилизации светом, то есть в течение 20—30 *мин* — до получения плотности приблизительно 0,2—0,3 над «химической» вуалью эмульсионного слоя.

Степень увеличения светочувствительности зависит от проявления. При медленном проявлении эффект латенсификации светом меньше, чем при проявлении в энергичном быстро работающем проявителе. Эффект латенсификации также больше, чем короче выдержки при съемке. Наибольшее увеличение светочувствительности получается при выдержках порядка тысячных долей секунды, какие бывают при высокоскоростной киносъемке. Наоборот, если выдержки длительные, как при цейтраферной съемке (более $^1/_{25}$ *с*), эффект латенсификации незначителен, а при выдержках в несколько секунд вовсе не наблюдается.

Усиление проявленного изображения. Проявленное фотографическое изображение на кинопленке можно усилить химическим способом.

При сильной недодержке максимальное усиление достигается с помощью хиноно-тиосульфатного усилителя следующего состава:

Раствор А

Вода дистиллированная ($t = 21$°C)	750 *мл*
Серная кислота концентрированная	30 *см*^{3}
Двухромовокислый калий	22,5 *г*
Воды дистиллированной дополнить	до 1 *л*

Вливать серную кислоту в воду нужно очень осторожно тонкой струей, во избежание разбрызгивания.

Раствор Б

Вода дистиллированная ($t = 21$°C)	750 *мл*
Бисульфит натрия	3,8 *г*
Гидрохинон	15 *г*
Воды дистиллированной дополнить	до 1 *л*

Раствор В

Вода дистиллированная ($t = 21$°C)	750 *мл*
Тиосульфат кристаллический	12,5 *г*
Воды дистиллированной дополнить	до 1 *л*

Рабочий раствор составляется следующим образом: 2 части раствора Б хорошо смешивают с 1 частью раствора А; затем добавляют 2 части раствора В и смесь взбалтывают. Очень важно, чтобы растворы были хорошо перемешаны.

В тщательно закупоренной бутыле раствор А может храниться неограниченно долго. Растворы Б и В сохраняются несколько месяцев. Раствор Б становится непригодным, когда он окрашивается, что указывает на окисление. Раствор В оказывается непригодным при выпадении в нем осадка.

Применение этого усиливающего раствора рекомендуется для обработки высокочувствительных кинопленок.

Перед погружением в раствор усилителя негативы должны быть хорошо промыты. Желательно применение 5-*мин* дубящей ванны следующего состава:

Вода	1 *л*
Формалин (40%-ный раствор формальдегида)	10 *см*^{3}
Углекислый натрий безводный	5 *г*

Задубленную и хорошо промытую кинопленку погружают в раствор усилителя и энергично помешивают во избежание образования полос. Наибольшее усиление изображения достигается при 10-*мин* обработке при температуре 20°C. После усиления кинопленка должна быть хорошо промыта в проточной воде в течение 10—20 *мин* и затем нормально высушена.

Главный недостаток усиления проявленного изображения заключается в повышении контраста и некотором окрашивании. Однако увеличение плотности изображения получается весьма значительное.

Использование возможностей оптики. Большинство современных объективов, предназначенных для съемок в обычных условиях при достаточном освещении, имеют относительное отверстие 1 : 2. Но даже и такая светосила используется нечасто, так как для увеличения глубины резко изображаемого пространства объектив диафрагмируют, уменьшая относительное отверстие до 1 : 4—1 : 8. Лишь когда уровень освещенности снимаемой сцены недостаточен для съемки с задиафрагмированным объективом, то диафрагму открывают полностью.

Для съемок при очень низкой освещенности применяют светосильные объективы, относительное отверстие которых 1 : 1,4; 1 : 1,2; 1 : 1; 1 : 0,95; 1 : 0,85 и даже 1 : 0,6.

Объектив с относительным отверстием 1 : 1,2 почти в три раза светосильнее, чем объектив с относительным отверстием 1 : 2. Проблема глубины резко изображаемого пространства при использова-

нии ультрасветосильных объективов решается путем уменьшения формата кинокадра, то есть применением узкой пленки, так как глубина резко изображаемого пространства тем больше, чем меньше масштаб изображения.

Объективы с относительным отверстием 1 : 1 и более светосильные пока являются специальными и называются ультрасветосильными. Такие объективы применяются для съемок при очень слабом свете. Разрешающая способность современных ультрасветосильных объективов от 15 до 20 *лин/мм* в центре поля кадра и от 5 до 8 *лин/мм* в углах кадра на 35-*мм* кинопленке. Чтобы использовать полную разрешающую способность ультрасветосильного объектива, нужно совместить кинопленку с плоскостью изображения с точностью 0,015 *мм*. Это требует очень высокого класса изготовления фокусирующей оправы объектива. Небольшие изменения расстояний между линзами, вызванные окружающими условиями, например влажностью, низкой или высокой температурой, могут не только привести к расфокусировке, но и нарушить юстировку оптических элементов в самом объективе.

Использование кинокамеры. В кинокамерах обычных конструкций отношение времени экспозиции (выдержки) к времени продвижения кинопленки и подготовки ее к съемке следующего кадра равно 1 : 3, когда угол раскрытия обтюратора равен 120°, или 1 : 2,3 — при угле раскрытия обтюратора 160°.

В новых конструкциях кинокамер с прерывистым движением кинопленки раскрытие обтюратора стремятся увеличить за счет уменьшения времени, необходимого для продергивания кинопленки.

При угле раскрытия обтюратора 240° время экспозиции каждого кадра будет в два раза больше, чем при угле раскрытия 120°, или в полтора раза больше, чем при угле раскрытия 160°.

Таким образом, кинокамеры с большим раскрытием обтюратора позволяют производить киносъемку при меньшей освещенности снимаемой сцены.

Способ замедленной киносъемки с последующим размножением кадров позволяет увеличить выдержку при экспонировании кадров, например, в два раза, если производить киносъемку с частотой 12 *кадр/с* вместо 24 *кадр/с*. Для получения нормального кинофильма с сохранением темпа печатают по два кадра позитива (или контратипа).

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Общие принципы электронного усиления яркости изображения. Электронно-оптические методы киносъемки при низких уровнях освещенности основаны на использовании электронно-оптических усилителей яркости изображения или же высокочувствительных передающих телевизионных трубок.

Электронно-оптическое усиление яркости изображения играет в оптике ту же роль, какую играют электронные усилители в акустике.

Электронно-оптический усилитель яркости изображения — это высоковакуумная стеклянная колба, отчасти со спайками стекло — металл. Одна сторона колбы имеет окно для входа световых лучей, на внутреннюю сторону которой нанесен полупрозрачный фотокатод. Если спроецировать с помощью объектива оптическое изображение на фотокатод, то в вакуум будут вылетать электроны в зависимости от интенсивности падающего света на каждую отдельную точку поверхности фотокатода. Электроны подвергаются высокому ускоряющему напряжению и с помощью электронно-оптических средств образуют изображение на флуоресцирующем слое, нанесенном на противоположную сторону колбы.

Изображение на флуоресцирующем экране выгодно получать уменьшенное, так как яркость его свечения возрастает пропорционально квадрату масштаба изображения.

В световой оптике уменьшение масштаба изображения объекта не ведет к увеличению его яркости, то есть к увеличению светового потока в пространстве изображения, испускаемого единицей поверхности в единичном телесном угле . Уменьшение величины изображения здесь сопровождается увеличением телесного угла, в котором распространяется световое излучение, поэтому яркость изображения остается неизменной.

В электронном усилителе яркости изображения дело обстоит иначе. Уменьшение электронного изображения в n раз увеличивает яркость, или светимость, изображения в n^2 раз, так как в электронной оптике уменьшение изображения не сопровождается потерей электронов.

Повышение яркости свечения флуоресцирующего экрана достигается также за счет ускоряющего поля в связи с увеличением энергии электронов.

В результате действия этих двух факторов изображение на флуоресцирующем экране имеет яркость во много раз бóльшую, чем яркость изображения, спроецированного на фотокатод.

Если применить фотокатод, чувствительный к лучистой энергии, которую человеческий глаз не может воспринимать, например ультрафиолетовые или инфракрасные лучи, то на флуоресцирующем экране можно получить изображение в видимых лучах. В этом случае прибор будет работать как преобразователь излучения из одного спектрального диапазона в другой. Поэтому такой прибор называют электронно-оптическим преобразователем изображения. Причем и в этом случае независимо от способа применения действует эффект усиления.

Совершенствование техники телевидения, рост чувствительности передающих телевизионных трубок и возможность получения ярких изображений на экране кинескопа позволяют рассматривать и телевизионную систему как своего рода усилитель яркости изображения. Как и в электронных усилителях яркости изображения, усиле-

ние получается за счет энергии источников питания видеоусилителей и приемной трубки — кинескопа.

Усиление яркости изображения с помощью телевизионной системы происходит в связи с преобразованием светового изображения в электрические сигналы. Однако усилители яркости изображения обладают существенными преимуществами, а именно: большей разрешающей способностью, относительной простотой, меньшими габаритами и массой, ничтожным расходом мощности.

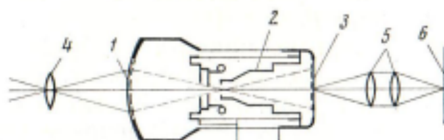


Рис. 11-1. Усилитель яркости изображения: *1* — фотокатод; *2* — конусообразный анод; *3* — флуоресцирующий экран; *4* — объектив; *5* — репродукционный объектив; *6* — кинопленка

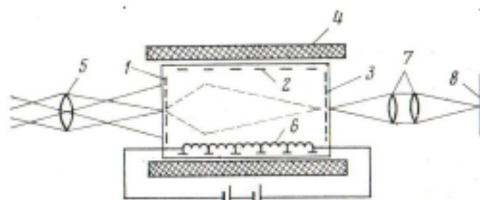


Рис. 11-2. Схема усилителя яркости изображения с магнитной фокусировкой

В усилителе яркости изображения происходит одновременный перенос всего изображения электронно-оптическим методом, без какого-либо сканирования.

Фокусирование электронного изображения осуществляется одним из трех способов: электростатическим, магнитным или равномерным электрическим полем.

Принципиальное устройство усилителя яркости изображения с электростатической фокусировкой изображено на рис. 11-1. Вакуумная трубка содержит полупрозрачный фотокатод *1*, конусообразный анод *2* и флуоресцирующий экран *3*. Объектив *4* образует оптическое изображение на фотокатоде. Кванты света, упавшие на фотокатод, вызывают эмиссию фотоэлектронов, которые ускоряются в электрическом поле с разностью потенциалов порядка 10—30 *кВ*. Пройдя диафрагму анода, электроны ударяются о флуоресцирующий экран с металлизацией, вызывая его свечение. Изображение на флуоресцирующем экране будет перевернутое. Общее усиление световой энергии относительно энергии на входе может достигать 100 и более, в зависимости от ускоряющего напряжения и других параметров прибора. Можно создавать увеличенное или уменьшенное изображение.

Схема усилителя яркости изображения с магнитной фокусировкой приведена на рис. 11-2. В этом приборе вакуумная трубка с полупрозрачным фотокатодом *1*, кольцевыми анодами *2* и флуоресцирующим экраном *3* помещена внутрь фокусирующей катушки (соленоида) *4*. Оптическое изображение, образованное объективом *5* на фотокатоде, вызывает эмиссию фотоэлектронов, которые ускоряются возрастающим напряжением каждого последующего кольцевого электрода при их движении к экрану. Совместное действие

большой разности потенциалов, направленной вдоль оси трубки, и магнитного поля заставляет электроны двигаться по спирали. На определенном расстоянии от фотокатода, зависящем от разности потенциалов, благодаря делителю напряжения *6* и напряженности магнитного поля электроны фокусируются и образуют электронное изображение соответствующих точек оптического изображения на фотокатоде. Оно проецируется объективами *7* на кинопленку *8*.

В усилителе яркости изображения с магнитной фокусировкой изображение остается прямым. Общее усиление световой энергии зависит от напряженности электрического и магнитного полей и может достигать 100. Изменение масштаба изображения в приборах с магнитной фокусировкой, как правило, не применяется в связи с техническими трудностями.

В усилителях яркости изображения с фокусировкой равномерным электрическим полем фотокатод и флуоресцирующий экран с металлизацией, являющийся одновременно и анодом, располагаются близко друг к другу. Между ними создается сильное электрическое поле, под действием которого электроны, вылетевшие из любой точки фотокатода, благодаря минимальному расстоянию и очень высокой разности потенциалов между катодом и анодом не претерпевают значительного рассеяния и создают на экране достаточно резкое изображение. Однако разрешающая способность приборов этого типа невысокая.

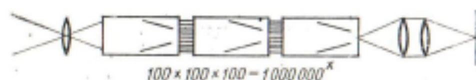


Рис. 11-3. Многокамерный усилитель яркости изображения. Однокамерные усилители сочленены с помощью стекловолоконных планшайб

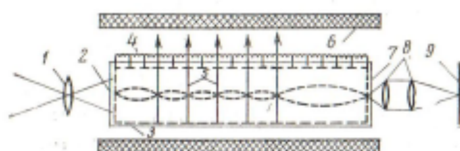


Рис. 11-4. Схема устройства усилителя яркости изображения с магнитной фокусировкой и усилением за счет вторичной электронной эмиссии:
1 — объектив; *2* — фотокатод; *3* — электроды (аноды); *4* — делитель напряжения; *5* — диноды (люминофор-фотокатод); *6* — катушка электромагнита; *7* — люминофорный экран; *8* — репродукционные объективы; *9* — кинопленка

Для получения большого общего усиления создают многокамерные усилители яркости изображения. На рис. 11-3 показан один из способов каскадного сочленения трех однокамерных усилителей яркости изображения, расположенных один за другим. Перенос изображения между каскадами здесь осуществляется с помощью стекловолоконных планшайб, а места их соединения заполняются жидкостью с показателем преломления, близким к показателю преломления стеклянных волокон, для уменьшения отражений.

В многокаскадном усилителе яркости изображения с электростатической фокусировкой, выполненном в виде одной колбы, перенос изображения между каскадами осуществляется следующим об-

разом: на очень тонкую прозрачную пластинку наносят с одной стороны люминофор, а с другой — фотокатод. Создаваемый люминофором световой поток проходит сквозь подложку и возбуждает фотокатод следующего каскада.

Имеются усилители яркости изображения, в которых большое усиление достигается за счет вторичной эмиссии электронов (рис. 11-4).

Принцип действия этого усилителя яркости изображения следующий. Объектив образует на фотокатоде оптическое изображение. Фотоэлектроны, вылетающие из фотокатода под действием света, ускоряются напряжением, прилагаемым к кольцевым электродам делителя напряжения, расположенным между динодами. Падающие на первый динод фотоэлектроны вызывают увеличенную эмиссию вторичных электронов с противоположной его стороны. Эти вторичные электроны ускоряются и движутся к следующему диноду, при ударе о него, снова вызывая вторичную эмиссию электронов. Такое лавинное умножение электронов продолжается до последнего каскада, где электроны возбуждают люминофор, вызывая флуоресценцию, то есть свечение экрана.

Электронное изображение фокусируется на каждом диноде и на флуоресцирующем экране с помощью магнитного поля, создаваемого многовитковой катушкой (соленоидом), окружающей трубку.

Характеристики электронно-оптического усиления яркости изображения. Общее усиление световой энергии с помощью усилителей яркости изображения может быть очень большое. Однокамерный усилитель, в зависимости от ускоряющего напряжения, может дать усиление от 25- до 100-кратного. С помощью двухкамерного прибора достигается усиление от 500 до 1500 крат. Трехкамерные приборы способны дать усиление яркости изображения в 50 000—100 000 раз (см. рис. 11-3).

Существенным препятствием для увеличения коэффициента усиления является фоновый шум или темновой ток, вызывающий постоянное фоновое свечение флуоресцирующего экрана. Этот шум ограничивает рабочее напряжение, а следовательно, и усиление яркости изображения.

Фоновый шум вызывается электростатической эмиссией электронов с электродов прибора, а также бомбардировкой фотокатода положительными ионами остаточного газа в трубке. Другой причиной может быть интенсивная обратная связь между флуоресцирующим экраном и фотокатодом. Свет излучается люминофором по всем направлениям и некоторая часть этого света может попадать на фотокатод, вызывая дополнительную эмиссию фотоэлектронов, которые направляются снова к флуоресцирующему экрану, вызывая в свою очередь дополнительное его свечение. Кроме того, материал фотокатода полупрозрачный и не поглощает весь падающий на него свет и часть света от объектива может проходить сквозь него и попадать на флуоресцирующий экран или его алюминиевую под-

ложку. Диффузное рассеяние этого света обратно к фотокатоду усиливает уровень фонового шума.

Коэффициент обратной связи между флуоресцирующим экраном и фотокатодом можно уменьшить снижением усиления. Поэтому при работе с электронно-оптическим усилителем яркости изображения не следует применять усиление большее, чем это необходимо в данном случае.

Пригодность электронно-оптических усилителей яркости изображения для хроникально-документальных или научных киносъемок зависит от того, насколько они удовлетворяют требованиям к качеству изображения на флуоресцирующем экране. Существенно важное значение имеют высокая разрешающая способность, большой интервал яркостей, отсутствие заметных геометрических искажений, быстрое затухание свечения, цветочувствительность фотокатода и цвет свечения люминофора.

Разрешающая способность электронно-оптических усилителей яркости изображения может быть получена достаточно высокой — порядка 50 *лин/мм* и выше. Такая разрешающая способность сравнима с разрешающей способностью высокочувствительной кинопленки, которая воспроизводит не более 60 *лин/мм*. Это удовлетворительная разрешающая способность. Хорошей разрешающей способностью в настоящее время считают такую, которую обеспечивает мелкозернистая кинопленка, а именно 150 *лин/мм*.

Способность электронно-оптических усилителей яркости изображения воспроизводить градации серых тонов теоретически значительно выше, чем у фотографического слоя кинопленки. Однако явления рассеяния, свойственные флуоресцирующим экранам, несколько снижают градационные характеристики усиленного изображения на люминофорном экране.

Геометрические искажения на флуоресцирующем экране современных электронно-оптических усилителей яркости изображения незначительны благодаря применению различных методов коррекции этих искажений.

Типичные характеристики спектральной светочувствительности фотокатодов (S-20 и S-25) приведены на рис. 11-5. Как видно из кривых, фотокатоды, применяемые в электронно-оптических усилителях яркости изображения, воспринимают лучи широкой области видимого спектра. Максимум чувствительности приходится на область синих лучей (около 400 *мкм*). Чувствительность плавно понижается в сторону более длинноволновых лучей и доходит почти до начала инфракрасной области (760 *мкм*).

Для электронно-оптических преобразователей, трансформирующих инфракрасное излучение в видимое, применяются другие фотокатоды, как, например, S-1, обладающий чувствительностью вплоть до $\lambda = 1100$ *мкм*.

Характеристики спектрального излучения обычно применяемых флуоресцирующих экранов приведены на рис. 11-6.

Время затухания свечения люминофора, так называемое послесвечение, имеет большое значение для определения пригодности об-

разуемого на нем изображения для киносъемки. Если люминофор обладает длительным послесвечением, то при съемке движущихся объектов на последующих кадрах будет фиксироваться постепенно угасающее изображение предыдущих кадров. Эта проблема решается применением люминофора с коротким послесвечением (длительностью порядка 1 *мс*).

Киносъемка изображения с флуоресцирующего экрана. При репродуцировании изображения с флуоресцирующего экрана электронно-оптического усилителя яркости изображения возникают боль-

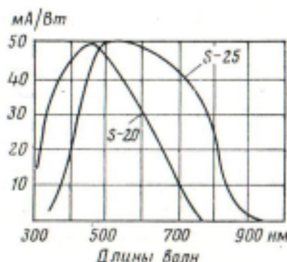


Рис. 11-5. Характеристики спектральной светочувствительности фотокатодов S-20 и S-25

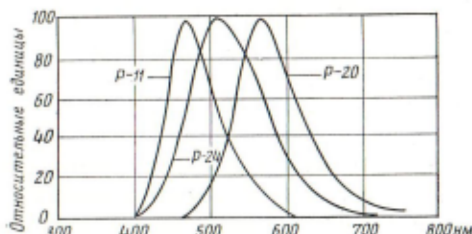


Рис. 11-6. Характеристики спектрального излучения люминофорных экранов

шие потери света. Объективы, служащие для передачи изображения с плоскости экрана на плоскость светочувствительного слоя кинопленки, имеют невысокую эффективность. Потери возникают также вследствие рассеяния света слоем люминофора и отражения от окна трубки. Около 50% света, излучаемого люминофором, направляется в сторону, противоположную окну трубки. Для повышения светоотдачи экрана на слой люминофора наносят тонкий слой алюминия. Но такое покрытие снижает разрешающую способность электронно-оптического усилителя яркости изображения.

В качестве люминофоров используются различные вещества, главным образом сульфиды, силикаты и окислы кадмия, кальция, магния, цинка и вольфрама, активированные металлами. Люминофоры классифицированы по эффективной яркости, цвету свечения, времени послесвечения и имеют обозначения от P-1 до P-35.

Теоретически могут быть получены флуоресцирующие экраны с разрешающей способностью до 300 *лин/мм* и эффективностью преобразования энергии 25%. Однако современные экраны обладают невысокими показателями разрешающей способности (около 50 *лин/мм*) и малой эффективностью преобразования энергии (3—5%). Кроме того, эти экраны не могут воспроизводить широкий интервал яркостей или уровней контраста. Большинство люминофоров воспроизводят лишь восемь-десять уровней яркости. Поэтому для репродукции изображения с флуоресцирующего экрана электронно-оптического усилителя яркости изображения необходимо применять

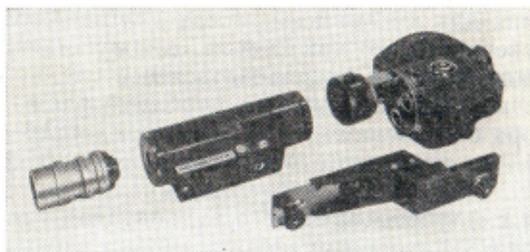


Рис. 11-7. Комплект киноаппарата с электронно-оптическим усилителем яркости изображения «Delnocta TS»

кинопленку, обладающую высоким коэффициентом контраста ($\gamma=1{,}0$ и выше). Цветочувствительность кинопленки должна быть согласована со спектральным распределением энергии в спектре свечения люминофора. Так как экраны электронно-оптических усилителей яркости изображения, как правило, имеют желто-зеленое или зеленое свечение, то наиболее подходящим фотографическим материалом является ортохроматическая кинопленка типа РФ-3 или (АС-1).

Для уменьшения потерь света при переносе оптического изображения с флуоресцирующего экрана на кинопленку применяют систему, состоящую из двух объективов, поставленных один за другим по способу тандем (см. главу 5 — «Макрокиносъемка»).

Электронно-оптический усилитель яркости изображения «Delnocta TS», разработанный и выпущенный в продажу фирмой «De oude Delft» (Голландия), является пассивной системой, дающей возможность производить киносъемку или видеозапись при очень слабом естественном свете, например ночью при свете луны и звезд без применения дополнительного освещения.

Этот прибор рассчитан для съемки 16-*мм* кинокамерой с наводкой по матовому стеклу с помощью зеркального обтюратора или иной системы и экспонометрической системой замера света за объективом.

Прибор «Delnocta TS» (рис. 11-7) представляет собой трехкаскадный электронно-оптический усилитель яркости изображения с электромагнитной фокусировкой. Сочленение каскадов осуществляется с помощью стекловолоконных планшайб.

Электронное усиление яркости изображения достигает 30 000 крат. Однако при переносе оптического изображения с флуоресцирующего экрана на светочувствительный слой кинопленки с помощью двух объективов (коллиматорного объектива и объектива кинокамеры), соединенных по способу тандем, коэффициент потери равен примерно девяти. Таким образом, усиление яркости изображения на кинопленке относительно яркости изображения на фотокатоде, то есть на входе, составляет около 3300 крат.

В приборе имеется устройство, которое автоматически регулирует электронное усиление в зависимости от яркости снимаемой сцены для поддержания оптимального режима, при котором достигается лучшее качество изображения.

Контраст изображения на флуоресцирующем экране сравнительно небольшой, поэтому для съемки рекомендуется применять высококонтрастную кинопленку и высококонтрастное мелкозернистое проявление.

Разрешающая способность, получаемая на кинопленке с применением усилителя яркости изображения, лежит в пределах 20—24 *лин/мм* по всему полю кинокадра на 16-*мм* пленке. Качество изображения можно сравнить с телевизионным изображением при развертке 400—450 строк.

В приборе «Delnocta TS» применен фотокатод S-25, спектральная светочувствительность которого приведена на рис. 11-5. Флуоресцирующий экран покрыт слоем люминофора Р-20. Характеристика его излучения показана на рис. 11-6. Цвет свечения этого экрана зеленый. Полный диаметр экрана равен 18 *мм*, но используемая часть экрана имеет диаметр 12,7 *мм*.

В прибор встроен коллиматорный объектив «Rayxar» $f=35$ *мм*, 1:0,95. Этот объектив установлен так, что его главная фокальная плоскость точно совпадает с плоскостью флуоресцирующего экрана. Если к нему приставить вплотную объектив кинокамеры с $f=35$ *мм*, наведенный на ∞, то на кинопленке в кадровом окне кинокамеры будет получено действительное изображение флуоресцирующего экрана в масштабе 1:1. Для получения наиболее яркого изображения на кинопленке объектив кинокамеры должен быть светосильным. Лучше, если это будет объектив «Rayxar» $f=35$ *мм*, 1 : 0,95.

Входной объектив, который образует изображение на фотокатоде, может быть любой, имеющий стандартную оправу «С». Для съемок ночью рекомендуется применять ультрасветосильные объективы, как, например «Анженье» $f=25$ *мм*, 1 : 0,95; «Анженье» $f=50$ *мм*, 1 : 0,95; «Анженье» $f=150$ *мм*, 1 : 2,7; «Канон-Зумленз» флюорит $f=12—120$ *мм*.

Чтобы получить изображение наилучшего качества, следует использовать минимальное электронное усиление, которое необходимо в данных условиях для уменьшения обратной связи между флуоресцирующим экраном и фотокатодом.

Питание прибора осуществляется от двух сухих элементов по 1,5 *В*.

Размеры электронно-оптического усилителя яркости изображения «Delnocta TS» 244×96×62 *мм;* масса 1,3 *кг*.

Для крепления прибора и входного объектива к кинокамере имеется поддерживающий лафет.

Глава 12

КИНОСЪЕМКА С БОЛЬШИХ УДАЛЕНИЙ

Иногда нужно снимать объекты, к которым по тем или иным причинам невозможно приблизиться, или есть желание творчески использовать специфический характер изображения, создаваемый длиннофокусной оптикой, или желание получить малую глубину резко изображаемого пространства.

Снимая, например, диких зверей или птиц в природных условиях, нельзя к ним приблизиться, чтобы не нарушить их поведения. Могут встретиться объекты, к которым нельзя приблизиться из-за сложного профиля местности или опасности.

Для того чтобы снять отдельные объекты на большом удалении, нужно применять объективы с большим, а иногда и с очень большим фокусным расстоянием. Длиннофокусные объективы выполняют ту же роль, что и зрительные трубы и телескопы при наблюдении удаленных объектов, — они дают возможность получать крупномасштабные изображения.

Крупномасштабную киносъемку с больших удалений с помощью длиннофокусных объективов называют телекиносъемкой.

Дальность видимости в горизонтальном направлении зависит от высоты точки наблюдения. Ее легко рассчитать, если известна высота h точки наблюдения по формуле: $3{,}57\sqrt{h}$ *км*.

Например, при $h=1$ *м* видимость будет равна: $3{,}57\sqrt{1}=3{,}57$ *км*; при $h=20$ *м* — около 16 *км*.

Может возникнуть вопрос: нельзя ли произвести киносъемку объектов, находящихся на большом удалении, в мелком масштабе с помощью обычного объектива с расчетом на последующее увеличение изображения способом оптической печати?

Современная техника отвечает на этот вопрос отрицательно. Возможность последующего увеличения фотографического изображения ограничивает зернистая структура эмульсионного слоя кинопленки. Практическим пределом увеличения масштаба изображения при переводе изображения с одной кинопленки на другую (без существенной потери деталей, снижения резкости и значительного выявления зерна) даже с самых мелкозернистых кинонегативов является в настоящее время пятикратное увеличение.

Допустим, что человек ростом 1 *м* 70 *см* находится на расстоянии 100 *м* от киноаппарата с объективом $f=50$ *мм*. Масштаб изображения в этом случае будет 1 : 2000, а изображение фигуры человека в кинокадре будет равно всего лишь 0,85 *мм*. В таком изображении вследствие зернистой структуры фотографического слоя кинопленки невозможно ни распознать сам объект, ни рассмотреть его действия.

Но если тот же объект (человек ростом 1 *м* 70 *см*) снять с того же расстояния 100 *м* объективом с $f=500$ *мм*, то его изображение в кадре будет в 10 раз крупнее, то есть 8,5 *мм*, что позволит увидеть его, рассмотреть движения и действия.

Если требуются более крупные планы, то необходимо применить объективы с еще бо́льшими фокусными расстояниями. Однако, как будет видно из дальнейшего, существуют пределы увеличению фокусного расстояния.

Во всех случаях от изображения, снимаемого с большого расстояния, требуются те же подробности, что и от объекта, расположенного близко. Кинокадр документального или научного фильма должен обеспечить узнаваемость человека или другого объекта, находящегося на расстоянии 50—100 *м* от киноаппарата, и распознаваемость характера действий объектов съемки на расстоянии до 1 *км*. Здесь требования к четкости изображения несравненно более высокие, чем при обычных съемках. Если дело идет о сравнительно малых расстояниях (50—100 *м*), то условия съемки еще не очень сложны. При расстояниях же порядка 1 *км* появляются серьезные затруднения.

Существует целый ряд обстоятельств, затрудняющих, а зачастую делающих и вовсе невозможным выполнение киносъемки длиннофокусным объективом параллельно земной поверхности. Так, например, слой пыли и различного рода испарений, стелящийся над землей в виде дымки, сильно затрудняет не только съемку, но даже простое визуальное наблюдение. В этих условиях значительно размываются контуры изображения объектов и снижаются светотеневые контрасты. На матовом стекле кинокамеры и на негативе действие этой дымки похоже на действие плохо корригированного объектива. Но кроме дымки, действие которой будет подробно рассмотрено ниже, есть еще и другое явление, которое приводит к размытости контуров и искажению изображения поверхностей. На большом расстоянии и под определенным углом даже очень грубые поверхности кажутся зеркально-гладкими. Эти наблюдения нагляднее всего можно провести на асфальтированном шоссе. Уже на расстоянии нескольких сот метров сравнительно грубая поверхность шоссе воспринимается зеркально-гладкой. Едущие по нему автомобили кажутся несущимися по воздуху. На море можно наблюдать подобные же явления. Благодаря этому отражению все контуры кажутся размытыми и окруженными светящимся ореолом. Поэтому изображения очень удаленных объектов имеют в большей или меньшей степени характер снимков, сделанных против света, что, впрочем, придает им некоторую своеобразную прелесть. Изменение

контуров изображения удаленных объектов зависит от фона, который находится позади объекта. Под влиянием дифракции света предметы на темном фоне кажутся шире, на светлом фоне — у́же. Если для телекиносъемки использовать толстослойную и грубозернистую кинопленку, значительно рассеивающую свет в толще эмульсионного слоя, то при нормальном проявлении негатива трудно ожидать удовлетворительных результатов.

Сильно мешает съемке, особенно летом, движение воздуха, вызванное нагревом солнечными лучами (явление конвекции). Перемешивание теплого и холодного воздуха в атмосфере создает оптические неоднородности, в которых быстро меняющиеся преломления света вызывают беспорядочную деформацию изображения удаленных объектов.

Наиболее благоприятные условия для телекиносъемки бывают утром или под вечер весной, осенью или зимой, когда солнце находится сбоку или на $^3/_4$ спереди от снимаемого объекта.

Точка съемки должна быть по возможности верхней, чтобы в кадр попадало как можно меньше неба во избежание явления засветки. Съемки с гор в глубокие долины и на большие водные пространства удаются лучше всего.

Съемки удаленных объектов на фоне неба: летящих птиц, самолетов, вертолетов, ракет и др. — сопряжены с большими трудностями. Дымка уменьшает интервал яркостей объекта и тем самым скрадывает сперва детали, а затем и весь объект. Яркий фон, которым являются небо и облака, образует ореолы и вуалирует все изображение. А когда объект движется, то меняется его положение относительно направления солнечных лучей, изменяется характер освещения объекта и яркость фона. Иногда объект оказывается расположен против солнца, и съемка совсем невозможна. Ко всему этому добавляется трудность панорамирования и удерживание в кадре движущегося объекта, когда углы изображения объектива очень малы.

Влияние атмосферных условий. При киносъемке объектов, находящихся на большом удалении, одновременно снимается и толща атмосферы, которая снижает видимость и четкость изображения.

Существенным фактором, определяющим прозрачность атмосферы, является содержание в ней водяных паров и различных примесей: пыли, дыма и др. Количество водяных паров и пыли в атмосфере очень изменчиво и зависит от метеорологических условий, физико-географических и климатических особенностей данного района, от сезона и времени дня.

При прохождении потоков лучистой энергии через атмосферу происходит их ослабление, вызванное тем, что часть лучистой энергии поглощается, а часть рассеивается. Оба эти явления — поглощение и рассеяние — действуют в атмосфере одновременно, причем в видимой области спектра преобладает рассеяние и для нее атмосфера является в основном мутной (рассеивающей) средой. За пределами видимой области спектра, в ультрафиолетовой и ин-

фракрасной областях, атмосфера является средой главным образом поглощающей.

Поглощение лучистой энергии в атмосфере избирательно, в результате чего в солнечном свете, прошедшем атмосферу, появляется большое число линий и полос поглощения, обусловленных действием газов и примесей, которые входят в состав атмосферы. Распределение энергии в спектре солнечного света, достигающего земной поверхности через замутненную атмосферу, приведена на рис. 12-1.

Содержащийся в значительном количестве в верхних слоях атмосферы озон сильно поглощает ультрафиолетовую радиацию солнца. Углекислый газ и кислород частично поглощают инфракрасные лучи. Преобладающее же значение в поглощении длинноволновой радиации принадлежит водяному пару.

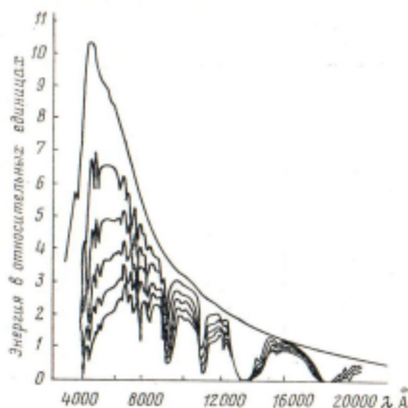


Рис. 12-1. Распределение энергии в спектре солнечного света, достигающего земной поверхности через замутненную атмосферу

Рассеяние света в атмосфере образует воздушную дымку, которая создает главное препятствие для видимости и фотографирования удаленных объектов.

Характер и интенсивность рассеяния света в атмосфере зависят от размеров рассеивающих частиц, взвешенных в атмосфере. Если рассеивающие частицы меньше длины световой волны, то интенсивность рассеяния определяется соотношением длины световой волны и размеров частиц. Рассеяния света в чистой атмосфере (без примесей водяных паров, пыли, дыма и пр.) пропорционально четвертой степени длины световой волны (закон Релея). Приняв за единицу коэффициент рассеяния для инфракрасных лучей ($\lambda=950$ *нм*), для ультрафиолетовых лучей ($\lambda=350$ *нм*) коэффициент рассеяния будет равен 54. Чистое небо мы видим голубым потому, что при прохождении солнечного (белого) света через слой чистой атмосферы коротковолновые лучи рассеиваются значительно сильнее, чем лучи длинноволновые. Когда рассеивающие частицы сравнимы с длиной волны света или больше нее, то изменения интенсивности рассеяния в зависимости от длины волны по закону Релея нет. Поэтому, например, облака, освещенные солнцем, кажутся белыми, так как водяные капельки, составляющие облака, достаточно велики и рассеивают одинаково световые лучи всех длин волн.

В зависимости от состояния атмосферы изменяется мутность воздушной среды и прозрачность ее бывает различной. В одних условиях (при минимальной дымке) мы можем видеть предметы, находящиеся от нас на очень большом расстоянии, иногда до 50 *км* и

более; в других (при сильном тумане) видимость не превышает нескольких метров.

Между атмосферной дымкой и туманом нет резкой разницы. Обычно под дымкой понимается такое состояние атмосферы, при котором дальность видимости составляет около 1 *км*. В табл. 12-1 приведены характеристики атмосферы по принятому в метеорологии коду дальности видимости, коэффициенты пропускания в видимой части спектра и соответствующие им оценки состояния атмосферы.

Таблица 12-1

Прозрачность атмосферы по метеорологическому коду

Балл по метеорологическому коду	Горизональная дальность видимости, *км*	Коэффициент пропускания на 1 *км*	Характеристика атмосферы
0	0,05	—	Очень сильный туман
1	0,2	—	Сильный туман
2	0,5	0,004	Средний туман
3	1	0,02	Слабый туман
4	2	0,14	Очень сильная дымка
5	4	0,33	Сильная дымка
6	10	0,67	Слабая дымка
7	20	0,82	Удовлетворительная видимость
8	50	0,92	Хорошая видимость
9—10	Более 50	0,96	Исключительно хорошая видимость

В зависимости от состояния атмосферы, определяемого метеорологическими условиями, воздушная дымка бывает разная:

1) воздушная дымка с преобладанием синих лучей, когда воздух относительно мало загрязнен частицами посторонних тел и, следовательно, когда солнечные лучи рассеиваются преимущественно молекулами газов по закону Релея, то есть обратно пропорционально четвертой степени длины световой волны;

2) воздушная дымка с преобладанием белых лучей, когда в воздухе имеется значительное количество частиц пыли, капелек воды или мелких кристаллов льда, когда лучи света всех длин волн рассеиваются в более или менее равной степени.

При наблюдении или фотографировании удаленных объектов через слой атмосферы на яркость самих объектов съемки накладывается яркость воздушной дымки, что приводит к уменьшению интервала яркостей объекта съемки.

Если яркость наиболее светлого участка объекта съемки обозначить $B_{\text{макс}}$, а наиболее темного участка $B_{\text{мин}}$, то интервал яркостей объекта

$$U = \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{мин}}}. \qquad (12\text{-}1)$$

При наблюдении или съемке удаленных объектов через слой атмосферы, имеющей коэффициент пропускания τ и яркость дымки Q, мы будем иметь:

$$U = \frac{B_{\text{макс}}\tau + Q}{B_{\text{мин}}\tau + Q}. \tag{12-2}$$

Пусть, например, самый светлый участок объекта съемки будет иметь яркость $B_{\text{макс}} = 100$ условных единиц, а самый темный $B_{\text{мин}} = 2$ условные единицы, тогда интервал яркостей

$$U = \frac{100}{2} = 50. \tag{12-3}$$

При коэффициенте пропускания $\tau = 0{,}7$ и яркости дымки $Q = 2$ условным единицам интервал яркости изменится:

$$U = \frac{100 \cdot 0{,}7 + 2}{2 \cdot 0{,}7 + 2} = 21{,}1. \tag{12-4}$$

Таким образом, с увеличением яркости воздушной дымки интервал яркостей объекта съемки уменьшается и при очень сильной дымке объект становится неразличимым.

Для преодоления воздушной дымки используют лучи света таких длин волн, которые менее всего рассеиваются атмосферой, а именно — оранжевые, красные и инфракрасные. Киносъемка с больших удалений при сильной воздушной дымке, выполненная в белом свете, может показать только неясные очертания предметов, в то время как съемка в красных или инфракрасных лучах может дать в тех же условиях отчетливые изображения.

Оптика для телекиносъемки. Трудности выполнения киносъемки с больших удалений определяются не только условиями прохождения света через толщу атмосферы. Получению изображения удаленных объектов с высокой степенью резкости препятствует тот факт, что разрешающая сила объектива находится в обратной пропорциональной зависимости от величины фокусного расстояния и квадрата относительного отверстия.

Объективы с коротким фокусным расстоянием при равноценном относительном отверстии обладают лучшей разрешающей силой, чем объективы длиннофокусные. Изображения, образуемые длиннофокусными объективами, отличаются специфической «мягкостью» рисунка, своеобразной размытостью контурных линий. Это явление ставит предел увеличению фокусного расстояния.

Практически для кинокадра на 35-*мм* кинопленке предельной величиной фокусного расстояния следует считать $f = 1000$ *мм* при относительном отверстии 1 : 6,3—1 : 8. Дальнейшим увеличением фокусного расстояния хотя и можно получить изображение в еще более крупном масштабе, но нельзя добавить новой информации, то есть улучшить различаемость деталей.

Коррекция объектива, как известно, осуществляется комбинацией различных сортов стекла и подбором радиусов кривизны отдельных линз. Объектив должен быть корригирован для разных длин волн света (хроматическая коррекция) и в отношении всех других аберраций (сферическая аберрация, кома, астигматизм, дисторсия, искривление поля). Так как рассчитать и изготовить идеальный объектив, совершенно свободный от аберраций, невозможно, то даже в самом лучшем объективе остаются остаточные аберрации. Поэтому точка не может быть передана объективом в виде точки, она изображается в виде кружка рассеяния. Все объективы дают кружок рассеяния, диаметр которого зависит от фокусного расстояния и относительного отверстия объектива. Уменьшить диаметр кружка рассеяния можно только диафрагмированием объектива. Минимальный диаметр кружка рассеяния определяет абсолютную разрешающую силу объектива и его пригодность для тех или иных целей.

Следовательно, чтобы получить наилучшую резкость изображения, необходимо задиафрагмировать объектив до оптимального значения, при котором достигается наибольшая абсолютная разрешающая сила.

Учитывая уменьшение разрешающей силы с увеличением фокусного расстояния, нецелесообразно изготовлять длиннофокусные объективы с большой светосилой. Поэтому все длиннофокусные объективы, начиная с $f=300$ *мм* и более, имеют небольшую светосилу — от 1 : 5,6 и ниже.

Длиннофокусные объективы, как правило, дают малоконтрастные изображения, поэтому при съемке такими объективами необходимо применять длинные бленды, которые надежно защищают переднюю линзу объектива от попадания на нее не только прямых солнечных лучей, но и бокового рассеянного света.

Сочность (бриллиантность) изображения зависит от количества рассеянного света, который создается в результате многократных отражений на поверхностях линз, оправ и тубуса внутри объектива. Этот многократно отраженный свет, рассеиваясь, накладывается на изображение и дает общее высветление, смягчая контрасты, от чего изображение становится вялым.

Необходимость в применении длинной бленды сохраняется также и при наличии просветляющих покрытий на линзах объектива, так как «гасящее» действие таких покрытий может быть достигнуто только для узкой спектральной зоны, тогда как видимый свет состоит из лучей различных длин волн в широком диапазоне спектра — от 450 до 760 *нм*.

Для киносъемки с больших удалений редко используются длиннофокусные объективы обычной конструктивной схемы ввиду их больших размеров и значительного веса. Чаще применяются оптические системы таких типов, как ландшафтная линза, телеобъектив и зеркально-линзовый объектив. Они отличаются от объективов обычной конструктивной схемы меньшими размерами и малым весом, что делает их более удобными для работы.

На рис. 12-2 даны принципиальные схемы четырех типов длиннофокусных объективов.

Длиннофокусный объектив (анастигмат) обычной конструктивной схемы (рис. 12-2, *а*) имеет фокусное расстояние до 1000 *мм*. Такие объективы громоздки и тяжелы, так как состоят из большого числа линз, вмонтированных в прочную металлическую оправу. Объективы, предназначаемые для аэрофотоаппаратов, обладают бóльшим полем изображения, способны давать хорошее изображение на площади кадра, примерно в 300 раз большей, чем площадь нормального кинокадра на 35-*мм* кинопленке.

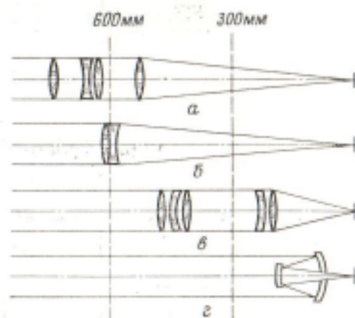


Рис. 12-2. Принципиальные схемы длиннофокусных объективов:
а — обычный объектив; *б* — длиннофокусная линза; *в* — телеобъектив; *г* — зеркально-линзовый объектив

В центральной части поля изображения объектива при малом относительном отверстии и исправлении только хроматической и сферической аберраций можно получить весьма резкое изображение с помощью более простой оптической системы. Основываясь на этой возможности, были созданы длиннофокусные объективы, построенные по принципу ландшафтной линзы, состоящей всего из двух оптических элементов: собирающей и рассеивающей линз, склеенных вместе (рис. 12-2, *б*). Такие объективы получили название длиннофокусных линз. Они имеют хорошую коррекцию хроматической и сферической аберраций. Исправления астигматизма, комы, дисторсии и искривления поля в длиннофокусных объективах не требуется, так как угол поля изображения их даже для большой стороны кадра чрезвычайно мал и составляет при $f=400$ *мм* — 3°09′, а при $f=1000$ *мм* — всего лишь 1°15′20″.

Длиннофокусные линзы имеют еще то преимущество, что эффективная светосила их значительно выше, а блесткость меньше, чем у объективов-анастигматов, ввиду малого числа поверхностей линз, граничащих с воздухом (всего две); потери света и внутреннее рассеяние в объективе весьма малы.

Длиннофокусные линзы с $f=400$ *мм* до $f=1200$ *мм* являются в настоящее время самыми распространенными объективами для киносъемок с больших удалений. Хотя длина таких объективов (без бленды) примерно равна их фокусному расстоянию, но вес стекол, оправы и тубуса минимальный. Разрешающая способность составляет в центре поля 20—25 *лин/мм*.

Разработанные Государственным оптическим институтом длиннофокусные линзы имеют следующие характеристики (табл. 12-2).

Широкое распространение получили также длиннофокусные линзы «Астро». Их характеристики приведены в табл. 12-3.

Третий тип длиннофокусного объектива — телеобъектив (рис. 12-2, *в*). У телеобъектива расстояние от передней линзы до

Таблица 12-2

Характеристики длиннофокусных линз ГОИ

Фокусное расстояние, *мм*	Максимальное относительное отверстие	Углы поля изображения	
		по вертикали	по горизонтали
500	1:6,3	1°50′00″	2°31′20″
850	1:5,6	1°08′40″	1°34′00″
1200	1:8	0°45′20″	1°03′20″

Таблица 12-3

Характеристики длиннофокусных линз «Астро»

Фокусное расстояние, *мм*	Максимальное относительное отверстие	Углы поля изображения	
		по вертикали	по горизонтали
400	1:5	2°18′40″	3°09′00″
600	1:5	1°31′20″	2°05′20″
640	1:5	1°26′00″	1°58′00″
800	1:5	1°08′40″	1°34′00″
1 000	1:6,3	0°55′20″	1°15′20″

плоскости изображения значительно меньше номинального фокусного расстояния, причем общая длина телеобъектива обычно не превышает 0,5—0,75 фокусного расстояния. Телеобъектив состоит из двух оптических элементов: из собирательного переднего элемента (телепозитива) и заднего рассеивающего элемента (теленегатива), расположенных на относительно большом расстоянии друг от друга.

Недостатками телеобъективов являются значительный вес, сложность конструкции, а также большие световые потери ввиду большого числа линз. Телеобъективы весьма чувствительны к постороннему свету, падающему на его переднюю линзу, в результате чего образуются рефлексы, снижающие контраст изображения. Поэтому при съемке телеобъективами необходимо применять длинные бленды.

Для киносъемок на 35-*мм* кинопленку применяются телеобъективы с фокусными расстояниями от 150 до 400 *мм*. Отечественный телеобъектив «Телемар-17» имеет фокусное расстояние 400 *мм* при относительном отверстии 1 : 4,5. Этот телеобъектив дает весьма качественное изображение и обеспечивает разрешающую способность в центре поля 40 *лин/мм*.

Четвертый тип длиннофокусного объектива (рис. 12-2, *г*) — зеркально-линзовый, в котором используется не только преломление света в линзах, но также и отражение от зеркальных поверх-

ностей. Ход лучей в зеркально-линзовой системе объектива следующий: отраженные объектом съемки в сторону объектива лучи света падают на вогнутое зеркало, расположенное в глубине тубуса, и, отразившись от него, направляются на зеркально-линзовый элемент, от которого идут через отверстие в центральной части зеркала на пленку, где образуют изображение. Преимуществом зеркально-линзовых объективов является их малая длина.

Система зеркально-линзового объектива разработана в Советском Союзе советским ученым Д. Д. Максутовым. Телеобъективы Максутова получили название МТО. Характеристики отечественных объективов МТО приведены в табл. 12-4.

Таблица 12-4

Характеристики зеркально-линзовых телеобъективов МТО

Название объектива	Фокусное расстояние, *мм*	Относительное отверстие	Углы изображения на 35-*мм* пленке		Дистанции фокусирования, *м*	Размеры объектива	
			по вертикали	по горизонтали		длина, *мм*	диаметр, *мм*
МТО-500	500	1:8	1°50′00″	2°31′20″	4—∞	150	100
МТО-1000	1000	1:10	0°55′20″	1°15′20″	10—∞	250	150

Оптические схемы объективов МТО-500 и МТО-1000 изображены на рис. 12-3. Объектив МТО-500 состоит из менисковой линзы *1*, вогнутого сферического зеркала *2* и склеенной пары линз *4*. На центральную часть выпуклой поверхности мениска *1*, ограниченную небольшой окружностью, нанесен зеркальный отражающий слой. Менисковая линза пропускает свет в объектив только через свою наружную кольцевую часть. Центральная часть ее непрозрачна и является выпуклым сферическим зеркалом *3*. Вогнутое сферическое зеркало *2* имеет в центральной части круглое сквозное отверстие. Для устранения бликов и рассеянного света внутри объектива имеется коническая трубка *5*. Лучи света, параллельные оптической оси, проходят через мениск *1* дважды, отражаются от зеркал *2* и *3*, проходят через склеенные линзы *4* и собираются в фокальной плоскости объектива, образуя изображение.

Фокусирование объективов МТО на предметы, находящиеся ближе ∞, осуществляется передвижением передней части с менисковой линзой с выпуклым зеркалом.

Зеркально-линзовые объективы не имеют диафрагмы. Правильную экспозицию при съемке зеркально-линзовыми объективами приходится устанавливать изменением выдержки, то есть установкой соответствующего угла раскрытия обтюратора в киноаппарате или с помощью автоматических систем, рассматриваемых в разделе «Экспонометрия».

Применение зрительной трубы для киносъемки с больших удалений. Зрительные трубы для рассматривания удаленных объектов могут быть применены и для киносъемки с больших удалений.

Они имеют широкое распространение и встречаются в разных видах, начиная от биноклей и кончая астрономическими телескопами.

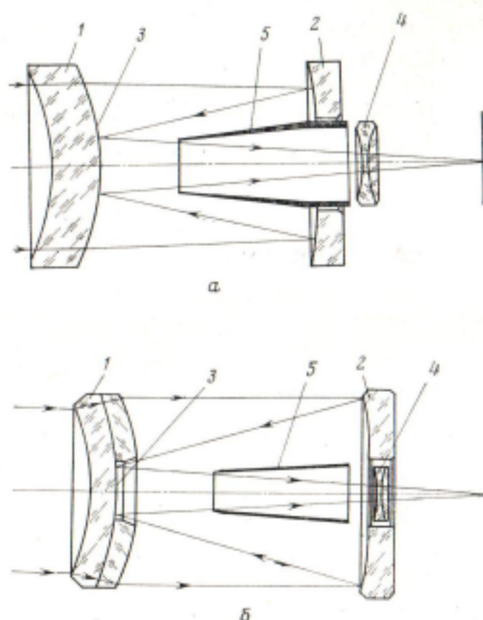


Рис. 12-3. Оптические схемы зеркально-линзовых объективов:
а — МТО-500; *б* — МТО-1000

Каждая зрительная труба состоит из двух оптических элементов: объектива и окуляра. Действительное (уменьшенное и перевернутое) изображение удаленного предмета, даваемое объективом, рассматривается в окуляр, как в лупу. Окуляр в некоторых системах оставляет изображение перевернутым, как, например, в астрономических трубах, или переворачивает изображение еще раз, давая в конечном счете прямое изображение. Получение прямого изображения, важного для наземных наблюдений, достигается разными способами: соответствующим устройством окуляра или применением дополнительных оборачивающих призм.

Зрительные трубы небольшого увеличения (не выше шестикратного, редко восьмикратного) в большинстве случаев построены по принципу зрительной трубы Галилея, состоящей из собирающей системы (объектива) и рассеивающей системы (окуляра).

Зрительные трубы другого типа, состоящие из объектива и положительной системы в качестве окуляра, основаны на принципе телескопической системы Кеплера.

Относительное расположение объектива и окуляра в зрительных трубах таково, что задняя фокальная плоскость объектива совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра. Поэтому изображение удаленных предметов, получающееся в задней фокальной плоскости объектива, изображается окуляром в бесконечно удаленной плоскости, то есть из выходного зрачка окуляра лучи света выходят в виде параллельного пучка.

Если позади выходного зрачка зрительной трубы установить киносъемочный аппарат с объективом, наведенным на ∞, то на пленке будет получено действительное изображение тех удаленных предметов, на которые наведена зрительная труба.

Так как окуляр зрительной трубы дает изображение в ∞, то вычисление линейного увеличения системы по общепринятым в фотографической практике формулам приводит к неопределенности. Поэтому для характеристики увеличения, получаемого при помощи зрительной трубы, пользуются понятием об угловом увеличении телескопической системы:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}, \tag{12-5}$$

где w и w' — видимые угловые величины предмета и изображения, то есть увеличение зрительной трубы равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.

Эквивалентное фокусное расстояние системы зрительная труба плюс объектив кинокамеры равно:

$$f_{экв} = \gamma f, \tag{12-6}$$

где γ — увеличение зрительной трубы, а f — фокусное расстояние объектива кинокамеры.

Для определения правильной экспозиции при съемке через зрительную трубу необходимо определить величину относительного отверстия системы. Эта величина зависит от диаметра входного зрачка зрительной трубы и эквивалентного фокусного расстояния системы.

Разрешающая способность телескопических систем выражается не числом линий на 1 *мм* изображения, а по угловому расстоянию между точками предмета. Разрешающую способность реальной системы соединения зрительной трубы с объективом кинокамеры можно определить путем съемки испытательной таблицы. Практически разрешающая способность такой системы оказывается вполне удовлетворительной.

Зрительные трубы, соединенные с кинокамерами, находят широкое применение при испытаниях и исследованиях баллистических ракет и управляемых снарядов. Фокусное расстояние некоторых из этих систем достигает 20 *м* и более. Такие системы носят название кинотелескопов.

Киносъемка через телескопы применяется также в астрофизических обсерваториях, например, для фиксации процесса развития протуберанцев на солнце, затмения солнца и т. п.

Оборудование кинокамеры. Длиннофокусные объективы и приспособления для визирования кадра слишком тяжелы, чтобы прикреплять их непосредственно к кинокамере. Поэтому необходимо иметь специальный лафет, который, поддерживая объектив, допускал бы одновременно свободное его выдвижение для наводки на фокус. Лафет должен прочно связывать объектив с телескопическим видоискателем и крепить их на штативе в центре тяжести. На рис. 12-4 показан один из возможных вариантов оборудования профессиональной кинокамеры для съемок с больших удалений. Лафет складной, он упаковывается в одном ящике вместе со всеми

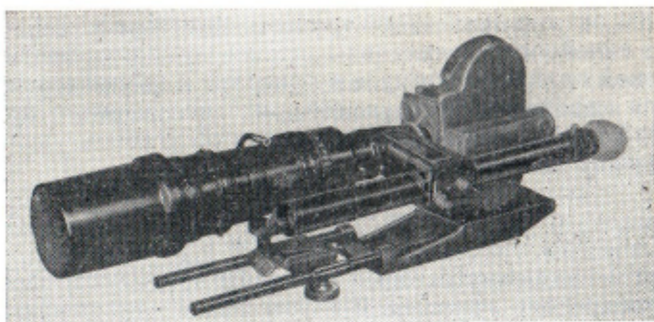


Рис. 12-4. Оборудование киноаппарата для киносъемки длиннофокусными объективами

другими приспособлениями. Благодаря тому, что лафет раздвижной, может быть сохранено равновесие кинокамеры на штативе при применении любых объективов.

Кинокамера и объектив должны быть связаны прочно, но иметь регулировочные устройства, которые давали бы возможность исправить нарушения юстировки объектива и телескопического видоискателя. Жесткие крепления даже при очень точной подгонке не могут гарантировать постоянства параллельности оптических осей длиннофокусного объектива и телескопического видоискателя.

Телескопический видоискатель является важным элементом оборудования кинокамеры с длиннофокусным объективом. Видоискатель типа зрительной трубы с большим полем зрения, дающий прямое (не перевернутое) изображение, должен иметь устройство, позволяющее точно юстировать его параллельно оптической оси объектива, а в случае необходимости и компенсировать параллакс.

Изображение объекта, наблюдаемое в видоискателе, должно быть достаточно крупным, чтобы во время визирования кадра можно было различать наиболее важные детали снимаемого объекта. Поле зрения видоискателя больше, чем поле кадра. В видоискателе имеется пластинка с нанесенными на ней перекрестием и прямоугольными рамками, которые показывают границы поля изображения для объективов с фокусными расстояниями 400, 600, 800 и 1000 *мм*. На рис. 12-5 показано поле зрения телескопического видоискателя для киносъемки длиннофокусными объективами.

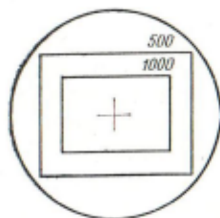


Рис. 12-5. Поле зрения телескопического видоискателя

Наводка на фокус. Точная и быстрая наводка на фокус всегда является предметом особых забот кинооператора. Чем длиннее фокусное расстояние объектива, тем бо́льшие трудности встречаются при фокусировке. Так, например, для объектива $f = 800$ *мм* при относительном отверстии 1:5 «бесконечность» начинается с расстояния 2500 *м*. Смещение плоскости изображения

при наводке на расстояния, близкие к ∞, очень мало, а неточность в установке на 0,1—0,05 *мм*, которая при наводке на близко расположенные объекты не имеет значения, здесь дает уже заметную нерезкость.

Излюбленным способом фокусирования является наводка по матовому стеклу. Но в данном случае этот способ оказывается недостаточно точным. Некоторая размытость изображения на матовом стекле при наводке на удаленные предметы придает даже хорошо сфокусированному изображению легкую нерезкость и сильно затрудняет нахождение наивысшей резкости.

Лучше всего находить фокус захватом его в своеобразную «вилку» и сужать ее до нахождения максимальной резкости.

Обычные конструкции устройств для наводки на фокус, например червячные оправы, в большей или меньшей степени неудобны в работе. Если ход червяка велик, то получение «вилки» еще выполнимо, но наводка с точностью до 0,1—0,05 *мм* затруднена и может быть достигнута только случайно, в случае удачи. Если же ход червяка мал, то наводка может быть произведена точно, но получение «вилки» затрудняется малым ходом червяка.

Допустим, что величина поступательного движения объектива в червячной оправе составляет 30 *мм* при повороте кольца червячной оправы (или штурвала) на 180°. Следовательно, при необходимости сместить объектив на 0,1 *мм* требуется повернуть кольцо (или штурвал) всего на 0°36′. Эта величина весьма незначительна и трудно достижима, особенно когда из-за низкой температуры или загрязнения червяка поступательное движение объектива затруднено и приходится прилагать усилие.

Решение найдено в специальной конструкции дополнительного привода с рукояткой, не имеющего мертвого хода при движении вперед-назад. Этот дополнительный привод допускает использование шкалы расстояний наводки с разнесенными делениями, благодаря чему наряду с быстрым захватом резкости в «вилку» можно производить наводку на фокус с точностью до десятых долей миллиметра. Кроме того, такой привод нечувствителен к низким температурам и загрязнению.

Дальнейшие трудности для точной наводки на фокус создаются зерном матового стекла. Зерно сильно мешает при рассматривании изображения через лупу, применение которой неизбежно из-за малых размеров кинокадра. Матовое стекло с очень мелким зерном только ухудшает дело, так как в этом случае стекло просматривается насквозь. Изображение кажется где-то впереди или позади плоскости наводки. Результатом являются грубейшие ошибки в наводке на фокус.

Большую помощь может оказать измерительный растр Дапай, который представляет собой стеклянную пластинку с матовыми полосками с обеих сторон. Эти полоски расположены таким образом, что при просматривании растра на просвет они смыкаются в сплошное матирование. При наводке на фокус по такому растру изображение видно в двух плоскостях: резким оно видно на всех

полосках с одной стороны стекла и нерезким — с другой. Для точной наводки необходимо добиться общей одинаковой степени резкости по всему растру (оптическое равновесие), что удается довольно хорошо после некоторого упражнения и благодаря возможности непосредственного сравнения резкости изображения на рядом лежащих полосках. При равномерной резкости изображения по всей поверхности растра плоскость наводки оказывается расположенной с весьма высокой точностью между обеими поверхностями растра. Плоскость кинопленки в кадровом окне юстируется по этой плоскости наводки в растре.

Применение растра Дапай при съемке объектов, расположенных близко от кинокамеры и контуры которых отчетливо видны, дает отличные результаты. При съемке же более удаленных объектов или предметов с нечеткими контурами наводка на фокус становится менее точной. При этом наблюдаются те же явления, что и при использовании дальномера с «разрезанным» изображением и стереодальномера.

Целесообразно отказаться от наводки на фокус по матовому стеклу и заменить ее наводкой через специальную, отъюстированную по плоскости кинопленки визирную лупу непосредственно по изображению в пространстве. При соответствующем подборе объектива и окуляра визирной системы наводка на фокус производится очень легко, так как изображение видно ярким и четким.

При работе с кинокамерой, оборудованной для телесъемки, пользуются обоими глазами. После того как объектив примерно направлен в сторону объекта съемки, его ловят в телескопическом видоискателе левым глазом. Средняя точка перекрестия телескопического видоискателя соответствует центру кадра в визирной лупе кинокамеры. Лупа устанавливается на резкость по кресту, в нее смотрят одновременно правым глазом и, таким образом, не теряя кадра в телескопическом видоискателе левым глазом, рассматривая изображение правым глазом, можно быстро и точно произвести наводку на фокус.

Выбор кинопленки для съемки с больших удалений зависит от особенностей снимаемого объекта, удаления от кинокамеры и состояния атмосферы (плотности воздушной дымки).

Одним из наиболее известных примеров является так называемое плановое фотографирование, когда объектив фотокамеры направлен перпендикулярно к поверхности земли и лучи света от снимаемых объектов пронизывают атмосферу по кратчайшему пути. Перспективная аэрофотосъемка, то есть съемка в сторону горизонта, применяется редко.

Местность при наблюдении с самолета имеет малый интервал яркостей. Поэтому применяемые для этих целей фотоматериалы имеют сильный контраст и высокую светочувствительность в длинноволновой части спектра. Негативы проявляются контрастно и не в мелкозернистых проявителях. Большие увеличения изображения не требуются — разрешающая способность материала считается

удовлетворительной, если предметы на земле размером с автомобиль могут быть распознаны по контурам или по тени.

Научный кинематограф ставит иные требования к киноизображению, а следовательно, и к кинопленке, предназначаемой для киносъемки с больших удалений.

Самое существенное отличие киносъемки с больших удалений для документального или научного фильма заключается в том, что такая съемка производится вдоль поверхности земли, а объекты съемки обладают большим интервалом яркостей, хотя в отдельных случаях могут встретиться и объекты с малым интервалом яркостей.

Для киносъемки с больших удалений вдоль поверхности земли наиболее пригодна панхроматическая кинопленка с повышенной чувствительностью к длинноволновой части спектра, дающая несколько повышенный контраст (γ=0,85—0,9), но не такой высокий, как у аэрофотопленки (γ=1,5—2,0). Кинопленка должна быть мелкозернистой, тонкослойной, иметь высокоэффективный противоореольный подслой, чтобы получить максимально резкое изображение.

Важное значение имеет мелкозернистое проявление. Кроме того, для получения высокой степени резкости должен быть выполнен целый ряд условий. Правильно экспонированные и правильно проявленные «тонкие» негативы обладают наилучшей резкостью, чем негативы, экспонированные с избытком и сильно проявленные. В первом случае меньше выступают явления образования ореолов, как диффузных, так и ореолов отражения. Основной принцип «экспонировать по теням» стоит некоторым образом в противоречии с условиями получения наиболее резкого изображения. Это правило совместимо с условиями достижения высокой степени резкости лишь только при применении очень тонкослойных противоореольных кинопленок.

Для киносъемок объектов на фоне неба (самолетов, ракет, космических кораблей и т. п.) используется специальная кинопленка, отличающаяся очень высокой противоореольностью.

Цветные киносъемки с больших удалений производят на обычные цветные многослойные негативные или обращаемые кинопленки, однако следует снимать на цветную кинопленку с повышенным контрастом.

В некоторых случаях для съемки с очень больших удалений целесообразно использовать цветную кинопленку, обладающую фотографическими характеристиками цветной аэрофотопленки. Эта пленка обладает высоким контрастом и весьма насыщенным цветом.

Применение светофильтров. При киносъемке с больших удалений обойтись без светофильтров не удается. Однако при выборе типа светофильтра для черно-белой съемки следует исходить из несколько иных принципов, чем при обычных съемках на натуре.

При съемке же с больших удалений через толстый слой атмосферы необходимо полностью выключить лучи коротковолновой

области спектра, так как они больше других рассеиваются, образуя воздушную дымку, и мешают построению изображения удаленных объектов. А для этого приходится применять уже не корректирующие, а так называемые селективные светофильтры, обладающие крутой кривой поглощения, повышающие контраст изображения удаленных объектов.

В зависимости от удаленности снимаемых объектов и плотности воздушной дымки применяют светофильтры желтого, оранжевого или красного цвета. Вполне достаточен комплект из четырех светофильтров: желтый ЖС-18, поглощающий все лучи с длиной волны короче 550 *нм*; оранжевый ОС-14, поглощающий все лучи короче 600 *нм*; светло-красный КС-11 с плавно меняющейся границей пропускания между 550—600 *нм* и красный средней плотности, пропускающий только красные лучи с длиной волны от 600 *нм*.

Поправка на фокусную разницу для каждого светофильтра различна. Кроме того, фокусная поправка зависит от характера хроматической коррекции объектива. Следовательно, фокусную поправку необходимо определять опытным путем.

Что касается кратности светофильтров, то при съемке удаленных объектов она оказывается, как правило, несколько меньшей, чем при съемке с близкого расстояния.

Цветную киносъемку с больших удалений производят с эскулиновым светофильтром, поглощающим ультрафиолетовые лучи. Может быть применен светлый слабо-оранжево-желтый светофильтр. Несмотря на это, изображение, снятое на цветную кинопленку с большого расстояния, всегда будет голубоватым.

При обычных съемках с близких расстояний светофильтр устанавливают перед объективом. Но для длиннофокусных объективов потребовались бы большие, дорогие и неудобные светофильтры. Поэтому в кинокамере, оборудованной длиннофокусным объективом, устанавливают небольшие светофильтры позади объектива или светофильтры-фолии, которые крепят перед кадровым окном в кинокамере.

Следует иметь в виду, что стеклянные светофильтры несколько сбивают шкалу фокусировки объектива. При съемке кинокамерой, имеющей визирное устройство с матовым стеклом, это нарушение фокусировки легко обнаруживается.

Экспонометрия. Применение обычного фотоэлектрического экспонометра для определения правильной фотографической экспозиции при съемке удаленных предметов не может дать удовлетворительных результатов.

Метод замера освещенности здесь непригоден потому, что съемка производится сквозь толстый слой атмосферы, которая создает воздушную дымку, а яркость дымки не бывает постоянной. Внесение поправки на глазок часто приводит к большим погрешностям. Наблюдается, что светлые объекты в большинстве случаев передерживаются, а темные — недодерживаются.

Замер средней яркости удаленных объектов с помощью обычного экспонометра невозможен из-за слишком большого угла охвата, который равен приблизительно 60°, в то время как углы поля изображения длиннофокусных объективов весьма малы и составляют несколько градусов или даже доли одного градуса. Например, объектив с $f=1000$ *мм* имеет углы охвата поля изображения при кинокадре 16×22 *мм* всего 0°55′20″×1°15′20″. В такой ситуации может оказаться пригодным только так называемый спотметр — фотоэлектрический экспонометр с очень узким углом охвата — порядка 1—3°.

Лучшее решение проблемы экспонометрии при съемке удаленных объектов длиннофокусными объективами заключается в применении экспонометрического устройства, которое замеряет освещенность, создаваемую светом, прошедшим объектив и достигшим фокальной плоскости в центральной части кадрового окна в кинокамере. Такие экспонометрические системы уже начинают внедряться в профессиональную киносъемочную аппаратуру.

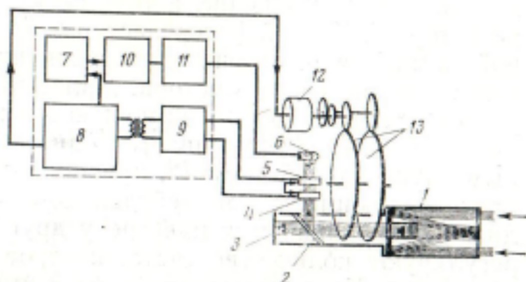


Рис. 12-6. Схема электронно-оптической системы для автоматической установки правильной экспозиции при съемке зеркально-линзовым объективом:
1 — зеркально-линзовый объектив; *2* — полупрозрачное зеркало; *3* — кинопленка; *4* — первый фоторезистор; *5* — второй фоторезистор; *6* — эталонная лампочка; *7* — счетно-решающее устройство; *8* — усилитель; *9* — стабилизатор напряжения; *10* и *11* — регуляторы экспозиции в соответствии со светочувствительностью кинопленки и выдержкой; *12* — реверсивный электродвигатель; *13* — дискообразные оптические нейтрально-серые клинья

Дальнейшее совершенствование экспонометрических устройств идет в направлении автоматизации.

Ручное регулирование экспозиции не всегда удобно и возможно, в особенности когда объект съемки быстро перемещается, а освещенность объекта и яркость фона изменяются. Примерами таких случаев съемки могут быть съемки взлета и полета птиц, самолетов и т. п. В этих случаях необходимо автоматическое регулирование экспозиции.

Современная техника, широко использующая электронику и шаговые сервоэлектродвигатели, решает проблему автоматического регулирования экспозиции в кинокамерах разными способами. Наиболее ранним и уже хорошо освоенным является способ автоматического регулирования диафрагмы объектива. Другой способ заключается в автоматическом регулировании выдержки путем изменения открытого сектора обтюратора. Третий способ состоит в том, что перед кадровым окном перемещается нейтрально-серый светофильтр переменной плотности.

Широко применяемые для съемки с больших удалений зеркально-линзовые объективы не имеют диафрагмы. Поэтому правильную

экспозицию приходится устанавливать либо изменением выдержки (регулированием угла раскрытия обтюратора), либо применением нейтрально-серых светофильтров разной плотности.

Одно из решений проблемы автоматической установки правильной экспозиции при съемке зеркально- линзовыми объективами дано в системе «Зуммар-Тралекс» (рис. 12-6).

Лучи света, прошедшие через зеркально-линзовый объектив *1*, падают на полупрозрачное зеркало *2*, расположенное перед кадровым окном кинокамеры. Около 85% света проходит к кинопленке *3* и образует изображение, а 15% света отражается в сторону фоторезистора *4*. Другой фоторезистор — *5* — освещается светом эталонной лампочки *6*. Происходит сравнение фототоков, протекающих через эти два фоторезистора. Далее результирующий ток модулируется частотой 60 *Гц* с помощью электронного устройства *7*, усиливается микроэлектронным усилителем *8* и управляет реверсивным электродвигателем *12*, приводящим в движение два диска *13*, представляющих собой нейтрально-серые оптические клинья. Эти диски поворачиваются навстречу друг другу на некоторый угол и регулируют количество света, которое может пройти к пленке от объектива. Питающее устройство *9* имеет электронный стабилизатор напряжения. Настройка прибора на светочувствительность кинопленки производится регуляторами *10* и *11*.

Глава 13

КИНОСЪЕМКА В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Киносъемка при сильном морозе. Низкая температура оказывает влияние как на работоспособность киносъемочного аппарата, так и на свойства кинопленки.

Киноаппарат, предназначенный для работы в нормальных температурных условиях (от +5°С до +40°С), часто не работает при морозе. Причиной тому является застывание смазки, а в некоторых случаях также уменьшение зазоров между трущимися частями механизма, изготовленными из разных материалов — с разными коэффициентами температурного расширения.

С понижением температуры снижается емкость электрических аккумуляторов и сухих батарей.

Для работы в условиях низких температур киносъемочный аппарат необходимо специально подготовить.

В зимнее время в восточных районах нашей страны, районах Крайнего Севера, в Арктике и Антарктике температура временами понижается до —55°С.

Готовясь к съемкам при сильном морозе, прежде всего необходимо выбрать тип киноаппарата. Следует отдать предпочтение киноаппарату с кассетной зарядкой или же с максимально простой зарядкой. Нужно также убедиться в том, что механизм киноаппарата не заедает при низких температурах. Проверить это можно только в термокамере в какой-либо лаборатории или на заводе, изготовляющем киноаппараты.

Далее необходимо выполнить следующее.

1. Промыть механизм киноаппарата обезвоженным керосином для удаления из него всей смазки, а затем произвести новую смазку подшипников и шестерен специальным незамерзающим маслом для низких температур. Скользящие детали грейферного механизма не смазывать.

Нужно помнить, что подготовленным таким образом для работы на морозе киноаппаратом нельзя пользоваться в условиях нормальной температуры.

2. Сшить для киноаппарата утеплительный чехол.

В специальных киноаппаратах, рассчитанных для работы на морозе, внутри корпуса имеются электронагревательные элементы с

автоматическим термовыключателем, который включает электрообогрев при температуре ниже —5°C и выключает при температуре выше +5°C.

Подготовленный для работы на морозе киноаппарат не следует вносить в теплое помещение после каждой съемки во избежание конденсации влаги на деталях механизма, которая затем на морозе, превратившись в лед, затруднит его работу.

Влияние низкой температуры на кинопленку выражается в том, что, во-первых, триацетатная основа кинопленки теряет эластичность и становится хрупкой, особенно когда она хранится на морозе в кассетах, во-вторых, понижается светочувствительность фотографического слоя (при температуре —50°C она может понизиться от двух с половиной до четырех с половиной раз). На рис. 13-1 показано примерное увеличение экспозиционного фактора для различных типов кинопленки в пределах температур от —50°C до +50°C.

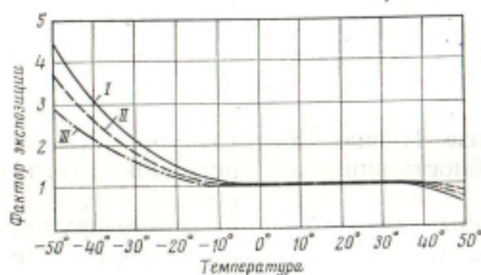


Рис. 13-1. Примерная зависимость светочувствительности кинопленки от температуры:
I — высокочувствительная кинопленка; *II* — кинопленка средней светочувствительности; *III* — низкочувствительная кинопленка

Кинопленку следует хранить в фабричной упаковке и заряжать в кассеты незадолго до съемки. Нельзя также оставлять ее в течение продолжительного времени заряженной в киноаппарате, так как при пуске аппарата пленка может порваться в местах перегибов, образующих петли.

Киносъемка в условиях тропического климата. Для тропического климата характерны высокая температура и большая влажность воздуха. При понижении температуры воздуха хотя бы на несколько градусов немедленно появляется роса.

Влага конденсируется на металлических частях киноаппарата и вызывает коррозию, а линзы объектива запотевают.

Большая влажность и высокая температура могут отразиться на фотографических свойствах кинопленки и вызвать фоторегрессию в уже экспонированной кинопленке.

Для работы в тропическом климате необходимо иметь.

1. Плотно закрывающиеся ящики для хранения киноаппаратуры и кинопленки. В ящиках должно находиться влагопоглощающее вещество.

3. Несколько жестяных коробок для хранения заряженных кассет.

3. Плотно закрывающийся бак для высушивания рулонов экспонированной кинопленки.

4. Необходимое количество влагопоглощающего вещества, например силикагеля (двуокись кремния), расфасованного в неболь-

шие мешочки из ткани и упакованного во влагозащитные коробки.

Силикагель можно употреблять многократно. Удаление из него влаги производится нагреванием его на сковороде или в открытой жестяной коробке.

5. Необходимое количество влагозащитной липкой ленты для заклеивания коробок с экспонированной кинопленкой.

6. Достаточное количество черной бумаги для упаковки кинопленки. Бумага должна быть хорошо просушена и уложена в железные коробки, оклеенные влагозащитной лентой.

Хранить неэкспонированную, как и экспонированную, но еще не проявленную кинопленку в тропических условиях нужно в относительно прохладных помещениях, например в подвалах зданий.

Вынесенные из прохладного помещения коробки с кинопленкой не следует открывать сразу; надо выждать, пока температура коробки не сравняется с температурой окружающего воздуха. Не следует также открывать коробку и перематывать кинопленку при большой влажности воздуха, так как кинопленка сразу впитает много влаги.

Экспонированную кинопленку перед упаковкой в жестяные коробки необходимо просушить в баке с силикагелем. Только после такой обработки экспонированную кинопленку можно завернуть в сухую черную бумагу и упаковать в коробки для отправки в кинолабораторию.

Киносъемка в условиях пустыни. В условиях пустыни, где преобладает высокая температура днем и низкая ночью, а воздух сухой, должны быть приняты меры для предохранения киноаппарата и кинопленки от воздействия тепла и песчаной пыли.

Высокая температура весьма неблагоприятна для киноаппарата: смазка изменяет свои свойства, высыхает, превращаясь в клейкое вещество, покрывающее трущиеся части механизма. Поэтому необходима частая чистка и смазка механизма киноаппарата.

Вещество, которым склеены линзы объектива, при температуре около +45°C начинает размягчаться, поэтому склеенные линзы могут быть легко повреждены.

Мельчайшие, но весьма твердые частицы песка при ветре проникают в механизм аппарата. Для защиты от песка на киноаппарат необходимо надевать чехол, а объектив защищать стеклом или светофильтром. Защитное стекло или светофильтр в случае повреждения можно заменить.

Для хранения неэкспонированной и уже экспонированной кинопленки следует выбирать наиболее прохладные места, как, например, подвалы зданий. Лучшим местом является обычный бытовой холодильник.

Глава 14

КИНОСЪЕМКА В ТРУДНОДОСТУПНЫХ МЕСТАХ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОВОДОВ, ЭНДОСКОПОВ И ПЕРИСКОПОВ

В недоступных для прямой киносъемки местах в ряде случаев могут быть использованы оптические устройства для дистанционного наблюдения, такие, как перископы, медицинские эндоскопы и волоконные световоды. Особенно большие возможности для наблюдения, фотографирования и киносъемки в труднодоступных местах открывают гибкие волоконные световоды.

Гибкий волоконный световод представляет собой жгут, состоящий из большого количества отдельных светонесущих жил (волокон) из стекла, кварца или пластика диаметром от 5 до 100 *мкм*.

Свет, падающий на входной торец световода, распространяется по волокну и выходит из него на противоположном конце, даже если световод имеет изогнутую форму. Передача света по волокну происходит вследствие явления полного внутреннего отражения, многократно повторяющегося на пути световых лучей. Для уменьшения световых потерь светонесущие жилы изготовляются из прозрачного материала с высоким показателем преломления в оболочке из материала с более низким показателем преломления.

Отдельные волокна укладываются в жгут параллельными рядами. На концах волокна скрепляются или склеиваются. Незакрепленные участки волокон имеют возможность перемещаться относительно друг друга, что придает жгуту гибкость. Если же волокна склеить (спечь) по всей длине, то получится жесткий волоконный световод.

Волоконный световод в виде пучка квадратного сечения 2×2 *мм* из волокон диаметром 5 *мкм* может передать 400 элементов в строке, в то время как телевизионный экран имеет около 500 элементов. Более того, волоконный пучок может передавать всю информацию о цвете без существенных искажений. Высокое светопропускание волоконных жгутов и способность передавать интенсивный свет позволяет осуществлять цветное фотографирование и киносъемку.

Оптические характеристики и физические свойства волоконных световодов определяются большим числом параметров, наиболее важными из которых являются: диаметр волокна, состояние поверхности, толщина оболочки, механическая прочность, тепловые характеристики, спектральное пропускание, рассеяние света, неоднородность и двойное лучепреломление.

При использовании волоконных световодов для киносъемки важнейшее значение имеет разрешающая способность, которая зависит от диаметра волокон. Разрешающая способность для волоконного световода приблизительно равна половине числа волокон, приходящихся на 1 *мм* длины поверхности его торца. Если объект, наблюдаемый или снимаемый через световод, движется, то разрешение будет в 1,5—2 раза больше (как на телевизионном экране).

Следует отметить, что разрешающая способность световодов

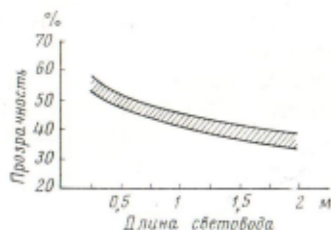


Рис. 14-1. Светопропускание гибкого волоконного световода в зависимости от его длины

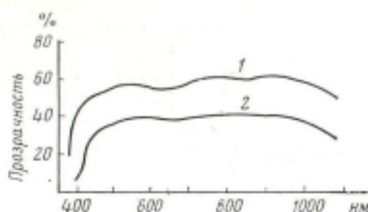


Рис. 14-2. Кривые спектрального пропускания световода фирмы «Карл Цейсс Иена» длиной 250 *мм* (*1*) и 2000 *мм* (*2*)

зависит в значительной степени от качества изготовления, постоянства диаметра волокна, точности укладки волокон и т. д.

Теоретическая разрешающая способность волоконных световодов может быть весьма высокая, а именно 100—150 *лин/мм*. Реальные же световоды дают разрешение всего 10—25 *лин/мм*. Но и это в ряде случаев бывает вполне достаточно для решения практических задач киносъемки в труднодоступных условиях, а для передачи световых потоков для освещения объектов съемки высокой разрешающей способности не требуется.

Светопропускание гибкого волоконного световода в зависимости от его длины приведено на графике (рис. 14-1).

Спектральная характеристика гибкого световода определяется материалом и диаметром светопроводящих жил. Кривые спектрального пропускания световода фирмы «Карл Цейсс Иена» длиной 250 и 2000 *мм* приведены на рис. 14-2. В инфракрасной области предел пропускания находится около 1100 *нм*, так как применяемые для изготовления световодов оптические стекла препятствуют прохождению тепловых лучей. Поэтому входящий в световод интенсивный свет на выходе из световода становится «холодным».

Свет от одного источника можно передать в труднодоступное место с помощью одного или нескольких волоконных световодов. Выходные концы гибких световодов можно подвести очень близко к снимаемому макрообъекту или укрепить концы световодов на объективе. В сложных пространственно протяженных объектах возможно высветить отдельные детали, оставляя неосвещенными менее важные или мешающие съемке части объекта.

Киносъемка через гибкий перископ. Киносъемка в труднодоступных местах (внутри камеры сгорания двигателя, внутри коробки скоростей или другого механизма) производится с помощью гибкого перископа, схема которого изображена на рис. 14-3. Периферические волокна световода используются для передачи света от лампы, находящейся снаружи. Средние волокна жгута служат для передачи изображения.

Перенос оптического изображения на кинопленку с выходного торца волоконного световода может быть осуществлен двумя спосо-

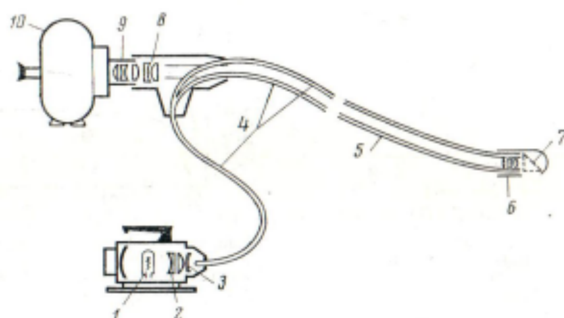


Рис. 14-3. Схема гибкого перископа для киносъемки в труднодоступных местах:
1 — лампа; *2* — конденсор; *3* — теплопоглощающий светофильтр; *4* — осветительный волоконный световод; *5* — волоконный световод, передающий изображение; *6* — объектив перископа; *7* — отклоняющая призма (используется при необходимости); *8* — окуляр перископа; *9* — объектив киноаппарата; *10* — киноаппарат

бами: 1) с помощью репродукционного объектива (или двух объективов, установленных друг против друга по системе тандем) или 2) контактным способом — киносъемочным аппаратом, в котором кинопленка вплотную примыкает (на время экспонирования) к торцу волоконного световода.

Киносъемка через эндоскопы. Волоконные световоды широко применяются в медицинских эндоскопах — приборах для обследования внутренних полостей человеческого тела (гастроскопия, бронхоскопия, ректоскопия, лапароскопия, цистоскопия). Последние достижения медицинской техники привели к созданию жесткого волоконного эндоскопа и подкожного зонда, позволяющего наблюдать участки, расположенные глубоко под кожей (рис 14-4).

Общий принцип устройства эндоскопов различного назначения, через которые может производиться киносъемка во внутренних полостях человеческого тела, остается тот же, что и гибкого волоконного перископа (см. рис. 14-3).

Диаметр вводимого внутрь полости волоконного световода с оболочкой обычно не превышает 12 *мм*, а длина, в зависимости от назначения, может быть от 400 до 650 *мм*. По центральной части

волоконного жгута передается изображение, а периферийные волокна используются для передачи света от лампы, находящейся снаружи.

Для выполнения киносъемки через эндоскоп объектив киноаппарата, установленный на ∞, примыкается вплотную к окуляру эндоскопа, посылающему в объектив пучки параллельных лучей.

Масштаб изображения будет тем крупнее, чем больше фокусное расстояние объектива киноаппарата. Однако светосила объектива не может быть использована полностью, так как выходной зрачок окуляра эндоскопа всегда меньше входного отверстия объектива киноаппарата. Поэтому целесообразно использовать в киноаппарате короткофокусный объектив, имеющий меньший диаметр входного отверстия, чтобы полнее использовать его светосилу.

При киносъемке через эндоскопы целесообразно использовать импульсное освещение от лампы, синхронизированной с работой киносъемочного аппарата, чтобы получить достаточное освещение, не нагревая живую ткань.

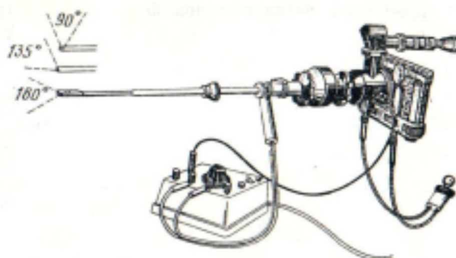


Рис. 14-4. Эндоскоп для фотографирования внутренних полостей человека

Киносъемка с регистрацией направления взгляда человека. Когда человек смотрит на что-либо, его взгляд благодаря высокой подвижности глаз быстро меняет направление, вводя в поле наилучшего ви́дения (желтое пятно на сетчатке глаза) интересующие его объекты и их детали. Это происходит всегда, любуемся ли мы пейзажем или произведением искусства, осматриваем ли обстановку места, в котором находимся, или управляем автомобилем и т. п. Даже в процессе сосредоточенной работы направление взгляда переходит с одного предмета на другой.

Регистрация направления взгляда человека имеет важное значение для инженерной психологии — науки, занимающейся изучением вопросов, связанных с разработкой рациональной организации рабочего места, расположения инструмента и приборов и т. д.

Например, на приборной доске современного самолета имеется более ста различных приборов, за показаниями которых летчик должен следить. Чтобы расположить все эти приборы наиболее правильно, необходимо знать, в какой последовательности и как часто они осматриваются и как подолгу задерживается взгляд летчика на каждом из них.

Аппаратура для регистрации направления взгляда человека (рис. 14-5) состоит из двух частей: 1) оптической системы, устанавливаемой перед глазами испытуемого, и 2) киносъемочного аппарата, фиксирующего поле наблюдения и световую метку. Обе эти части соединены между собой гибким световодом.



Рис. 14-5. Аппаратура для регистрации (киносъемки) направления взгляда человека

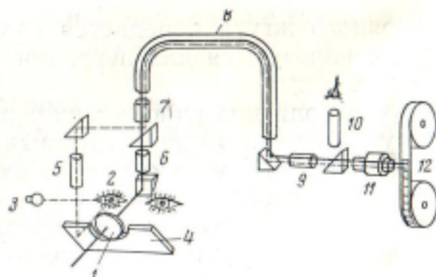


Рис. 14-6. Оптическая схема аппаратуры для регистрации направления взгляда:
1 — объектив, изображающий поле наблюдения; *2* — глаз; *3* — электролампа; *4* — полупрозрачное зеркало; *5* — объектив, изображающий световую метку; *6* — релейный объектив, передающий изображение поля наблюдения; *7* — релейный объектив, передающий изображение световой метки; *8* — гибкий волоконный световод; *9* — объектив, передающий совмещенное изображение поля наблюдения и световой метки; *10* — видоискатель; *11* — объектив киноаппарата; *12* — кинопленка

Оптическая схема аппаратуры для регистрации направления взгляда изображена на рис. 14-6. Объектив, расположенный перед переносицей испытуемого, охватывает пространство, входящее в его поле зрения (по горизонтали 31,4°, а по вертикали 22,5°). Изображение предметов, находящихся в поле наблюдения, передается с помощью релейных объективов и волоконного гибкого световода в киносъемочный аппарат. Находящееся перед глазами испытуемого полупрозрачное зеркало служит для того, чтобы отразить в отдельный объектив блик от глазного яблока. Этот блик создается маленькой (точечной) лампой. С помощью двух призм и релейных объективов блик в виде световой метки изображается также на пленке в киноаппарате. В результате в кинокадре получается изображение предметов, находящихся в поле зрения испытуемого, и световая метка (точка или крестик), которая перемещается в зависимости от поворота глазного яблока испытуемого, отмечает направление его взгляда.

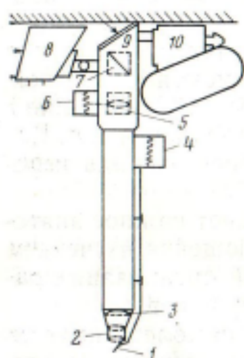


Рис. 14-7. Схема установки для киносъемки архитектурных макетов через перископ:
1 — зеркало; *2* — объектив; *3* — коллиматорная линза; *4* — электродвигатель наклона зеркала; *5* — релейный объектив; *6* — электродвигатель фокусировки; *7* — светорасщепительный кубик; *8* — телевизионная камера; *9* — зеркало; *10* — киносъемочный аппарат

Киносъемка архитектурных макетов через перископ. Жесткий перископ — оптическое устройство, презназначенное для наблюдения из закрытых мест, например из подводной лодки или из-за бруствера окопа, оказался необходимым для киносъемки архитектурных макетов, которые содаются при разработке ре-

шений по реконструкции старых городских районов и проектировании новых. Обычно для принятия больших архитектурных проектов необходимо всесторонне изучить эстетическую ценность их в сочетании с окружающей местностью и прежними застройками. Чтобы показать, как будут выглядеть улицы новых или реконструируемых городов с точки зрения людей в будущем городе, необходимо произвести киносъемку на макетах с очень низкой точки.

Предназначенная для таких киносъемок установка была разработана в США. Она позволяет производить киносъемку из таких мест, в которые невозможно установить киносъемочный аппарат.

Схема установки показана на рис. 14-7. Основная часть — вертикальная труба длиной 890 *мм* и внешним диаметром 64 *мм*, а на конце — 25 *мм*. На нижнем конце трубы расположен объектив и под ним — квадратное зеркало размером 19×19-*мм* (или 51×51 *мм*). Наклон зеркала можно изменять с помощью стержневой тяги. Зеркало отражает световые лучи в объектив. Позади объектива имеется коллиматорная линза, формирующая параллельный пучок лучей света. Релейный объектив передает изображение в телевизионную камеру (от светоделительной призмы) и после отражения от второго зеркала — в кинокамеру. Визирование кадра производится по изображению на экране телевизионного монитора. Можно произвести видеозапись на магнитную пленку и одновременно снять кинофильм. Киносъемка может быть произведена на 35- или 16-*мм* кинопленку.

Вся установка подвешивается над объектом съемки на операторском кране или на потолке на специальной каретке, которая перемещается по рельсам.

Так как съемка макета ведется с очень близкого расстояния, для получения нужной глубины резко изображаемого пространства необходим объектив с относительным отверстием 1:16. При съемке на 16-*мм* кинопленку применяется объектив с фокусным расстоянием 15 *мм*, а при съемке на 35-*мм* кинопленку — объектив с фокусным расстоянием 28 *мм*.

Глава 15

КИНОСЪЕМКА ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Киносъемка хирургических операций обычно выполняется в целях научной документации наиболее важных и уникальных случаев хирургического вмешательства, показа действия новейшей хирургической аппаратуры или же техники какой-либо новой оригинальной операции.

Основная особенность проведения киносъемки в операционной — это строжайшее соблюдение требований асептики, ибо объектом съемки является больной человек, лежащий на операционном столе, оперируемое поле и хирург. Поэтому одна из главных задач кинооператора заключается в том, чтобы ни чем не мешать ходу операции (ни аппаратурой, ни освещением) и поддерживать тишину в операционной. Смена точки съемки, передвижение штатива с киноаппаратом, осветительных приборов и т. п. должны производиться с особой осторожностью, бесшумно, так как любой неожиданно возникший шум, например падение крышки от объектива, вызывает большой резонанс, который может отразиться на работе хирурга.

Строжайшее соблюдение асептики в основном заключается в том, что киноаппаратура и осветительные приборы должны быть идеально чистыми, а кинооператор не должен соприкасаться ни с операционным столом, ни со стерильным столом хирургических инструментов, ни с халатами оперирующих хирургов.

Свет от киноосветительных приборов не должен мешать или отвлекать хирургов, а продолжительность работы осветительных приборов должна быть такой, чтобы не отражаться на оперируемом поле, не перегревать живую ткань. Нужно всегда учитывать, что операционная — самое малоприспособленное для киносъемки помещение.

Весь процесс киносъемки хирургической операции должен быть заранее согласован с ведущим хирургом. План съемки должен быть тщательно разработан, продуманы все моменты работы, намечены все точки съемки, отработана расстановка осветительных приборов. Предварительно нужно сделать все возможное, чтобы в процессе операции уже ни в чем не мешать работе хирургов.

При киносъемке хирургической операции кинооператор не может изменить ход событий, он почти всегда не может просить повторить

тот или иной момент операции. Операция обычно идет вне зависимости от киносъемки, хирург не может ждать кинооператора. Поэтому кинооператор практически не имеет возможности дублировать съемки, если киносъемка производится одним аппаратом и одним кинооператором. Поэтому кинооператору необходимо предварительно изучить процесс операции, чтобы составить точный план съемки, рассчитать продолжительность съемки отдельных этапов операции, сделать все для согласованной работы с оперирующим хирургом.



Рис. 15-1. Типичный кадр из кинофильма о хирургической операции

При съемке без режиссера кинооператор, выбрав нужную точку съемки, должен находиться в готовности, внимательно следить вместе с помогающим ему хирургом-консультантом за ходом операции. В нужный момент кинооператор знаками или шепотом дает сигнал включить осветительные приборы и производит съемку. Немедленно, если нет перебивочных планов, по окончании съемки осветительные приборы выключаются. В промежутках между съемками кинооператор подготовляет аппарат (производит смену объектива, перезарядку аппарата пленкой, перестановку осветительных приборов и т. д.) согласно плану.

Во всем сказанном в основном и определяется специфика киносъемки в хирургических операционных.

Основными объектами киносъемки хирургических операций являются хирургическое поле, инструмент, руки хирурга и его ассистентов (рис. 15-1).

В качестве монтажно-перебивочных планов фильма по ходу сценария могут быть средние и общие планы, показывающие работу хирургов, их лица, работу операционных приборов, всю операционную.

Таким образом, киносъемка хирургической операции ведется в основном крупным планом с одной постоянной точки. Лучшей точкой является та, с которой видит операционное поле ведущий хирург. Поэтому киноаппарат обычно устанавливают на штативе за хирургом, съемка ведется под углом приблизительно 45° к плоскости операционного стола, выше плеча хирурга. Иногда точка съемки может быть левее или правее ведущего хирурга и производится в «просвет» между ним и его ассистентами.

Иногда киноаппарат бывает удобно установить напротив ведущего хирурга.

Со стороны головы оперируемого киноаппарат практически установить невозможно, так как мешают наркозные аппараты и врачи-анестезиологи, дающие наркоз.

При всех хирургических операциях на грудной клетке всегда желательна верхняя точка съемки, а не под углом к операционному столу. Эта точка отражает наиболее полную картину процесса операции. Однако из-за невозможности поставить киноаппарат со штативом вплотную к операционному столу и висящая над столом большая бестеневая осветительная арматура не допускают съемки отвесно сверху без особых устройств.

Частичное решение задачи показа оперируемой полости и деталей ее в глубине с верхней точки возможно с помощью демонстрационного зеркала, имеющегося теперь почти над всеми операционными столами. Это зеркало расположено под углом около 45° к операционному столу.

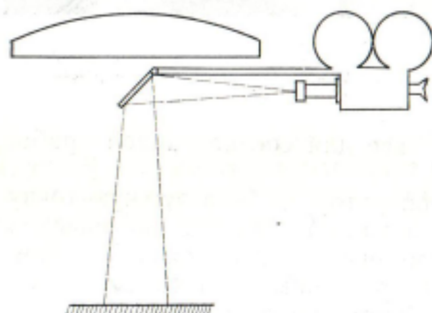


Рис. 15-2. Схема киносъемки операционного поля через зеркало, находящееся на конце кронштейна, укрепленного на киносъемочном аппарате

Еще лучше, если зеркало поместить на конце кронштейна, укрепленного на самом киносъемочном аппарате (рис. 15-2). Для лучшего освещения операционной полости на том же кронштейне можно установить легкий прожектор с йодно-кварцевой лампой.

Недостаток съемки отраженного зеркалом изображения заключается в том, что изображение получается зеркальным, то есть перевернутым. Этот недостаток можно исправить посредством оптической печати позитива или контратипа.

В особо важных моментах, когда по ходу операции необходимо показать какую-либо деталь в оперируемой полости, хирург может быстро отойти от стола и дать возможность кинооператору произвести съемку определенного кадра.

Часто бывает нужно производить киносъемку операции одновременно с двух точек — двумя киноаппаратами. Тогда один кинооператор снимает только крупным планом с постоянной точки, а другой может свободно менять точки съемки, перемещаться по операционной и снимать не только операционное поле, но и перебивочные планы; он может снимать как со штатива, так и с рук, пользоваться подставками или лестницей-стремянкой.

В настоящее время наиболее трудными для киносъемки являются операции на сердце и операции по пересадке органов, когда применяется всевозможная вспомогательная аппаратура для искусственного дыхания, искусственного кровообращения, электрокардиографы, рентгеновская аппаратура, сложные наркозные аппараты и т. д. с большим штатом медицинского обслуживающего персонала.

В таких стесненных условиях работать кинооператору чрезвычайно трудно. Возникающие иногда напряженные моменты (кровотечения, остановка сердца и его массаж, дефибриляция и т. п.) час-

то создают обстановку, в которой хирурги уже забывают о киносъемке и вообще могут закрыть собой все операционное поле.

При нормально протекающих хирургических операциях кинооператор имеет возможность просить хирурга изменить немного положение оперируемого или наклон операционного стола, раздвинуть хирургическим расширителем возможно больше оперируемую полость и т. п. Однако все это выполнимо лишь в пределах очень короткого времени и возможностей хирурга в ходе операции.

Хороший и опытный хирург, который заинтересован в создании научно-документального фильма, всегда всеми своими действиями стремится помочь кинооператору занять нужное положение с лучшей видимостью операционного поля.

Техника киносъемки хирургических операций. Для киносъемки хирургических операций необходим киноаппарат с большим запасом кинопленки, так как частая перезарядка аппарата, всегда требующая перерыва съемки, может привести к тому, что некоторые очень важные моменты операции не будут сняты.

Желательно, чтобы киноаппарат был бесшумным или хотя бы малошумным, не мешающим нормальной работе хирургов, производящих операцию.

Ввиду невозможности приблизить киноаппарат к операционной полости из-за требований асептики, киносъемка основного объекта — операционного поля — производится длиннофокусным объективом. При съемке на 35-*мм* кинопленку применяют объективы с фокусными расстояниями от 75 до 150 *мм*, а на 16-*мм* кинопленку — от 35 до 75 *мм* или больше. Даже макросъемка должна выполняться длиннофокусным объективом, снабженным дополнительной раздвижной оправой соответствующей длины.

Целесообразно применение объектива с переменным фокусным расстоянием, который исключает потери времени на перестановку объективов в ходе съемки.

Большой светосилы объектива не требуется, потому что для получения необходимой глубины резко изображаемого пространства объектив приходится так или иначе диафрагмировать до 1:4 или 1:5,6.

Применение длиннофокусных объективов не создает дополнительных трудностей в получении нужной глубины резко изображаемого пространства при съемке операционного поля, являющегося не плоским, а имеющим некоторую протяженность в глубину.

Глубина резко изображаемого пространства не зависит от фокусного расстояния объектива, она определяется масштабом изображения. Дело в том, что чем длиннее фокусное расстояние, тем больше расстояние, с которого получается оптическое изображение объекта, ограниченного рамкой заданных размеров в пространстве предметов перед киносъемочным аппаратом.

Рассмотрим это на примере. Допустим, что операционное поле, изображение которого должно быть охвачено кинокадром, равно 330×440 *мм* (рис. 15-3). Чтобы поле заданных размеров поместить

в кинокадр на 35-*мм* кинопленке (размер кинокадра 16×22 *мм*) с помощью объектива $f=25$ *мм*, расстояние между главной плоскостью объектива и плоскостью наводки в пространстве предметов должно быть равно 0,5 *м*. Если же мы применим объектив $f=50$ *мм*, то это расстояние уже должно быть равным 1 *м*, а при объективе $f=100$ *мм* — 2 *м*.

Вычислив по известным формулам глубину резко изображаемого пространства, получаемую с объективами $f=25$, 50 и 100 *мм* при соответствующих дистанциях наводки, получаем следующие результаты (табл. 15-1).

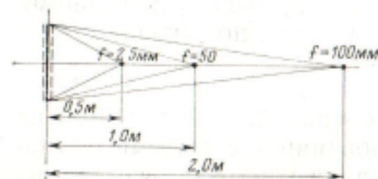


Рис. 15-3. Схема киносъемки хирургического поля объективами разных фокусных расстояний

Из приведенных данных видно, что глубина резко изображаемого пространства почти не зависит от фокусного расстояния объектива, если масштаб изображения в кадре один и тот же. Более того, объективы длиннофокусные дают даже несколько бо́льшую глубину резко изображаемого пространства, нежели объективы короткофокусные.

Рассматривая вопрос о глубине резко изображаемого пространства, необходимо отметить преимущество съемки хирургических операций на узкую 16-*мм* кинопленку. Это преимущество вытекает из того факта, что глубина резко изображаемого пространства зависит от масштаба изображения. Чем мельче масштаб изображения, тем больше глубина резко изображаемого пространства.

Масштаб изображения в кинокадре на 16-*мм* кинопленке мельче, чем в кинокадре на 35-*мм* кинопленке, а глубина резко изображаемого пространства в соответствии с этим в четыре раза больше, если в расчете принять тот же диаметр кружка рассеяния, как для 35-*мм* кинокадра ($z'=0{,}025$ *мм*). Но даже повысив требование к абсолютной резкости изображения в 16-*мм* кинокадре, приняв $z'=0{,}013$ *мм*, то и тогда глубина резко изображаемого пространства на 16-*мм* кинопленке будет больше, чем в два раза.

Таблица 15-1

Диаметр кружка рассеяния $z'=0{,}025$ *мм*

Фокусное расстояние объектива, *мм*	Расстояние до плоскости наводки, *м*	Глубина резко изображаемого пространства (в *мм*) при диафрагмах			
		1:2,8	1:4	1:5,6	1:8
25	0,5	98	124	187	278
50	1,0	104	131	211	303
100	2,0	105	132	212	304

Это обстоятельство позволяет производить киносъемку на 16-*мм* кинопленку при меньшем в два раза уровне освещенности снимаемого объекта.

Проблема определения правильной экспозиции при киносъемке хирургических операций может быть решена наилучшим образом с помощью экспонометрического устройства, вмонтированного в киносъемочный аппарат и замеряющего освещенность изображения в

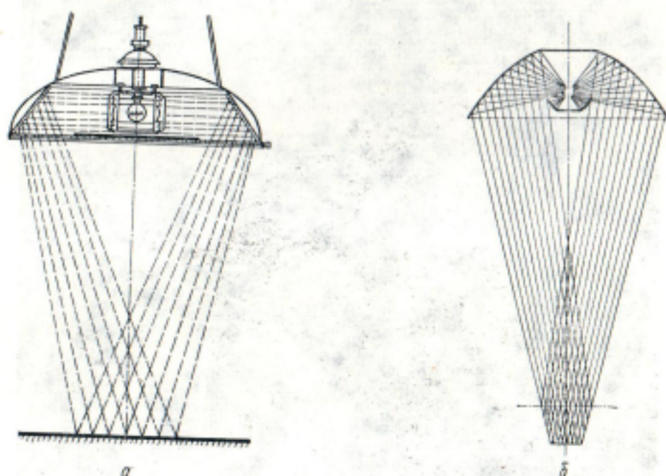


Рис. 15-4. Схемы двух одноламповых осветителей бестеневого освещения

кадровом окне. Можно использовать также фотоэлектрический экспонометр с малым углом охвата (спотметр), замеряющий яркость малых участков снимаемого объекта. Замеры же освещенности операционного поля практически невозможны, так как нельзя приблизиться к операционной полости для производства замеров.

Техника освещения в хирургических операционных. Основное осветительное оборудование операционного зала состоит из специального устройства для бестеневого освещения операционного поля, подвешиваемого к потолку или тяжелому подвижному штативу. Кроме того, обычно имеются вспомогательные передвижные светильники, смонтированные на вертикальных штангах.

Принцип действия осветительного устройства для бестеневого освещения заключается в том, что свет направляется на операционный стол не отвесно сверху, а с периферии зеркального венца большого диаметра или большого параболического отражателя, в центре которого имеется круглая непрозрачная пластинка, затеняющая центральную часть рефлектора. Таким образом создается как бы кольцевое освещение. Схемы двух одноламповых бестеневых осветительных приборов изображены на рис. 15-4.

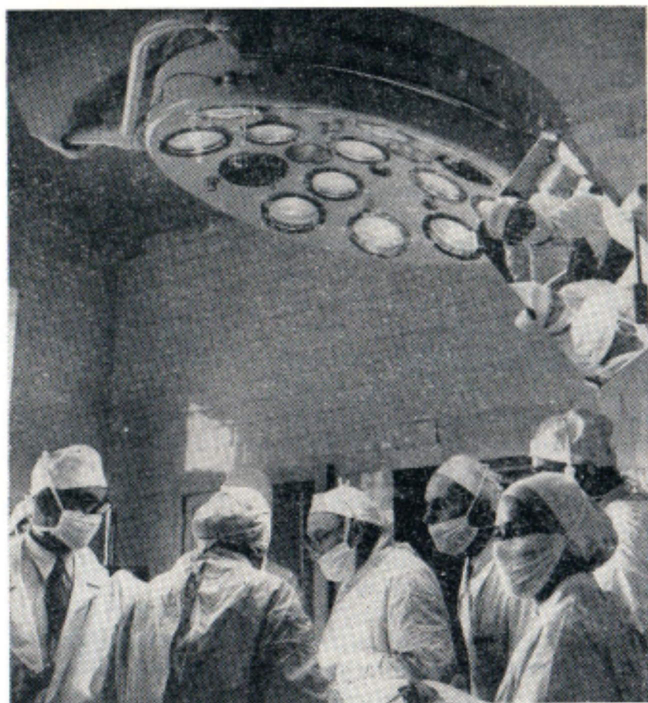


Рис. 15-5. Прибор бестеневого освещения с несколькими лампами

В бестеневом осветительном устройстве типа «Сциалитик» лампа накаливания находится внутри бочкообразной линзы Френеля, как в маяке. Эта система помещена в центре зеркального венца, состоящего из отдельных фацеток. Лучи света, формируемые линзой Френеля, направляются к зеркальному венцу и, отразившись от зеркал, падают под углами на операционное поле хирургического стола. Диаметр зеркального венца бывает от 450 до 890 *мм*.

В осветительном устройстве «Пантафос» лучи света от лампы формируются в сходящийся пучок с помощью вогнутого зеркала параболической формы диаметром от 600 до 800 *мм*. Под электролампой против центральной части рефлектора имеется непрозрачная пластина, задерживающая прямые лучи от лампы к освещаемому полю.

В бестеневых приборах применяются электролампы мощностью 120—150 *Вт*. Лампа заключена в колпак из теплопоглощающего стекла. Передняя часть прибора закрыта защитным стеклом с впаянной в него проволочной сеткой. Такие лампы создают на операционном поле диаметром 150 *мм* освещенность около 6500 *лк*.

Имеются бестеневые осветительные приборы с люминесцентными лампами. Отечественное бестеневое осветительное устройство

диаметром 800 *мм* имеет восемь люминесцентных трубок по 15 *Вт* каждая и создает освещенность на операционном поле 2000 *лк*.

В последнее время все большее применение находят бестеневые приборы, состоящие из нескольких ламп (от 3 до 15 штук), расположенных по периферии вогнутого диска, диаметр которого достигает 1,5 *м* (рис. 15-5). Такое осветительное устройство может создавать на операционном поле освещенность до 20 000 *лк*.

Все осветительные приборы бестеневого освещения операционного поля имеют устройства для аварийного питания ламп от аккумуляторов. В новых моделях таких светильников переход на аварийное питание при отключении сети осуществляется автоматически.

В качестве вспомогательных в операционных помещениях применяются осветительные приборы с параболическим рефлектором, которые смонтированы на штативе (рис. 15-6). Имея лампу 150 *Вт* и рефлектор с диаметром 180 *мм*, осветительный прибор, установленный на расстоянии 2 *м*, создает освещенность около 500 *лк* в пятне диаметром около 30 *см*. Переносные осветительные приборы обычно имеют фокусировку лампы и дают возможность сконцентрировать свет на меньшей площади, чтобы получить бóльшую освещенность.


Рис. 15-6. Осветительный прибор на штативе

Освещения от бестеневого прибора обычно вполне достаточно для экспонирования цветной кинопленки, имеющей светочувствительность 90—100 ед. ГОСТ, при диафрагме объектива 1:4—1:5,6, а иногда и 1:8. Однако с одним бестеневым освещением нельзя достичь объемного выразительного изображения. Поэтому при киносъемках научных документальных медицинских фильмов необходимо применение хотя бы минимума специальных киноосветительных приборов направленного света, таких, как малогабаритный прожектор «Луч-300» с йодно-кварцевой лампой накаливания 300 *Вт*, с питанием от аккумулятора.

При киносъемках крупным планом только одного операционного поля достаточно дополнительно рисующего и контурного света. Но когда нужно снимать не только операционное поле, но и самих хирургов, а также приборы, используемые при операции, всю медицинскую технику и общий вид операционной, совершенно необходимы дополнительные киноосветительные приборы разных типов.

При этом должны соблюдаться требования асептики — идеальная чистота. Желательно, чтобы используемые в операционном помещении осветительные приборы и штативы имели светлую окраску, по которой легче следить за их чистотой.

Продолжительное освещение операционной полости, особенно направленным светом, приводит к недопустимому нагреву живой ткани. Поэтому может потребоваться установка на киноосветительных приборах теплопоглощающих фильтров. Лучшим же решением

проблемы получения «холодного» света является применение в осветительных приборах отражателей с многослойным интерференционным покрытием.

Зеркальные отражатели, которые вместо серебряного отражающего слоя имеют алюминиевое многослойное интерференционное покрытие, отражают только «холодный» видимый свет (400—700 *нм*); все же длинноволновые лучи (от 700 *нм* и более) пропускаются интерференционным покрытием и рассеиваются в пространстве за ним. Интерференционное покрытие получают нанесением в вакууме методом осаждения до 17 тонких слоев.

На рис. 15-7 показано расположение отражающей поверхности с серебряным и многослойным интерференционным покрытием, а

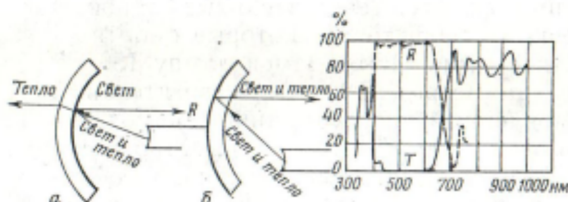


Рис. 15-7. Отражатель с интерефеpенционным покрытием (*а*) и серебряным (*б*). Справа — графики спектрального отражения (пунктирная линия) и спектрального пропускания (сплошная линия) отражателя с многослойным интерференционным покрытием

также графики спектрального отражения и пропускания отражателя с многослойным интерференционным покрытием.

Коэффициент отражения света видимой области рефлектора с многослойным интерференционным покрытием равен 92—93%; он значительно выше для видимой области спектра, чем коэффициент отражения зеркала с серебряным покрытием.

Выбор кинопленки. Кинофильмы о хирургических операциях теперь снимают, как правило, на цветную кинопленку. Цветное изображение помогает лучшему распознаванию внутренних органов во вскрытой полости. В ряде случаев по цвету живой ткани и крови можно отличить здоровые органы от больных.

Освещение в операционных помещениях смешанное. Бестеневые осветительные приборы бывают как с лампами накаливания, так и с люминесцентными. Теплопоглощающие светофильтры и защитные стекла на медицинских осветительных приборах также оказывают светофильтрующее действие. Кроме того, во всех операционных в большей или меньшей мере присутствует естественный свет, проникающий через окна, обычно обращенные на север. В общем, спектральный состав света в операционной не соответствует сенсибилизации цветных многослойных кинопленок, рассчитанных ни для дневного освещения (5500 К), ни для ламп накаливания (3200 К).

В области операционного поля преобладает искусственный свет от бестеневой лампы, который в большинстве случаев более близок к цветовой температуре ламп накаливания. Если цветная киносъемка производится на негативную кинопленку типа ЛН, то, как показывает практика, получить почти безупречную передачу цвета можно с помощью цветовой коррекции при печати цветного позитива.

Для получения правильной цветопередачи при съемке хирургической операции на цветную обращаемую кинопленку необходимо подобрать балансирующие светофильтры. При этом большую помощь может оказать измеритель цветовой температуры.

Глава 16

ПОДВОДНЫЕ КИНОСЪЕМКИ

Оптические свойства водной среды. Зависимость проникновения солнечных лучей в воду (при спокойной поверхности) от высоты солнца показана на графике (рис. 16-1).

Значительно труднее учесть проникновение в воду света диффузно рассеянного атмосферой и облаками из-за разнообразия углов падения и неодинаковой яркости различных участков небосвода. В среднем 95% падающего на водную поверхность диффузно рассеянного света проникает в воду, а 5% отражается. При волнении водной поверхности проникновение света в воду резко уменьшается. Освещенность под самой поверхностью воды оказывается на 15—30% меньше той, которая должна бы быть с учетом отражения. Это явление получило название эффекта поверхностной потери, которое объясняется тем, что волны действуют как собирающие и рассеивающие цилиндрические линзы; они фокусируют лучи света в небольших объемах, создавая в других областях заметные разрежения. Объемы воды, в которых свет фокусируется, в солнечный день хорошо видны сверху на светлом песчаном дне водоема как быстро бегущие струи света.

При высоте солнца, близкой к 25°, проникновение солнечных лучей в воду остается одинаковым как в штилевую, так и в ветреную погоду, составляя приблизительно 90%.

Длина пути лучей света, проходящих в водной среде наклонно, также зависит от угла падения на поверхность воды. Чем ниже положение солнца относительно горизонта, тем большее расстояние они должны пройти до достижения определенной глубины. Так, например, при высоте солнца над горизонтом 50° световой луч проходит 3,6 *м*, прежде чем достигнет глубины 3 *м*.

Продолжительность съемочного времени под водой всегда значительно меньше, чем на поверхности воды или на суше. Рассвет под водой начинается позже, а сумерки наступают раньше. Наиболее благоприятное время для подводной киносъемки от 10 *ч* утра до 3 *ч* дня.

Свет, проникающий в толщу даже самой чистейшей воды, рассеивается ее молекулами и частично поглощается. Являясь прекрасным растворителем, вода редко встречается в природе абсолютно чистой. Растворенные же в воде вещества оказывают влияние на ее оп-

тические свойства. Поглощение света вызывается как молекулами самой воды, так и растворенными в ней неорганическими и органическими веществами. Кроме того, океанская, морская, речная и озерная вода, как правило, содержит огромное количество мелких нерастворимых частичек неорганических и органических веществ и различных микроорганизмов, находящихся во взвешенном состоянии. Эти взвеси также рассеивают и поглощают свет. Поглощенная световая энергия превращается в тепло, а рассеянная распространяется в разные стороны.

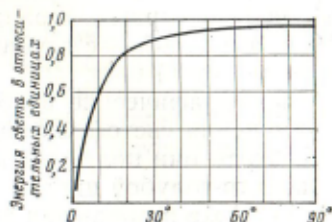


Рис. 16-1. Проникновение солнечных лучей в воду в зависимости от высоты стояния солнца

В чистой морской или океанской воде вдали от берега преобладает поглощение, а рассеяние незначительно. В воде же прибрежной зоны, и особенно в речной, рассеяние света во много раз сильнее, чем поглощение.

В поверхностном слое воды солнечные лучи еще сохраняют вид направленного света, но с глубиной каждый луч как бы делится на многие лучи, расходящиеся в разных направлениях; эти лучи вновь делятся, и процесс длится до тех пор, пока свет не станет полностью рассеянным. Причем интенсивность света, рассеянного вперед, в тысячи раз больше интенсивности света, рассеянного назад.

На большой глубине, куда еще проникает естественный свет, царит мягкое верхнее рассеянное освещение зеленовато-голубого цвета.

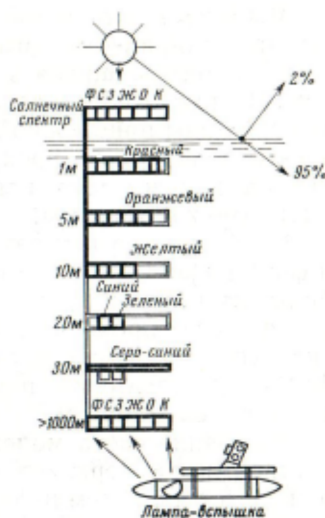


Рис. 16-2. Изменение цветности предметов в водной среде на разных глубинах

Поглощение и рассеяние света водой неодинаково для разных областей спектра. Наиболее сильно поглощаются красные, оранжевые, желтые и фиолетовые лучи. Чистая вода наиболее прозрачна для голубых лучей. Толща чистой воды, равная 20—25 *м*, поглощает и рассеивает свет приблизительно так же, как 25—30 *км* воздуха, и придает подводным пейзажам такую же голубую окраску, как воздушная дымка горам, расположенным вдали.

Наибольшее рассеяние в воде претерпевают синие, голубые и зеленые лучи, которые образуют подводный туман, аналогичный воздушной дымке в атмосфере. Рассеянные лучи, распространяющиеся в водной среде во всевозможных направлениях, придают сине-голубую или зеленовато-голубую окраску морю.

Так как толща воды действует, как цветной светофильтр, цвет наблюдаемых под водой предметов меняется с увеличением глуби-

ны погружения. Если в чистой воде на глубине 1 *м* все поля цветной таблицы (рис. 16-2) кажутся почти такими же, как на воздухе, то с увеличением глубины краски становятся менее яркими и некоторые из них совсем исчезают, становясь темными. На 5-*м* глубине ярко-красный цвет становится розовым, а на глубине около 15 *м* — абсолютно черным. Оранжевый цвет исчезает, начиная с глубины 10 *м*, а желтый — с глубины 20 *м*; одновременно начинает тускнеть и фиолетовый цвет.

Фотографические изображения на цветной пленке, снятые без применения светофильтра на глубине более 10 *м*, имеют такой вид, как будто они получены на черно-белой пленке и тонированы в зеленовато-голубой цвет.

Если же на большой глубине включить источник искусственного освещения, например подводный прожектор, то обнаруживается ослепительная игра красок с преобладанием оттенков оранжевого и красного — именно тех цветов, которые первыми отфильтровываются толщей воды.

Мы говорили о чистой морской или океанской воде. Но вода разных мест по-разному поглощает и рассеивает свет, в зависимости от свойств содержащихся в ней веществ и размеров взвешенных частиц. На рис. 16-3 показано, как поглощается солнечный свет 3-*м* толщей воды прибрежной зоны и мутной в сравнении с чистой океанской водой. Свет, пропускаемый чистой океанской водой, выглядит на просвет голубым, водой прибрежной зоны — зеленым, а мутной — желтоватым.

Необходимо учитывать, что изменение цветности наблюдаемых и фотографируемых под водой предметов зависит не только от глубины, на которой производится съемка, но от полного расстояния, которое свет проходит в воде. Полный путь световых лучей в воде складывается из расстояния между поверхностью воды и фотографируемым предметом плюс расстояние между снимаемым предметом и киноаппаратом.

Рассеяние света молекулами воды и всевозможными мелкими частицами, размеры которых меньше длины световой волны, сопровождается явлением поляризации. При этом большая часть поляризованного света распространяется перпендикулярно направлению прямого солнечного луча. Эффект поляризации света в водной среде может быть использован для преодоления подводного тумана так же, как и воздушной дымки в атмосфере.

Явления поглощения и рассеяния ослабляют свет, распространяющийся в водной среде. Оптическая плотность чистой воды почти в 1000 раз превышает оптическую плотность воздуха.

Ослабление интенсивности света с увеличением пути его прохождения в воде происходит по экспоненциальному закону.

На рис. 16-4 приведены графики, показывающие ослабление естественной освещенности под водой в зависимости от глубины.

Разумеется, наиболее точные данные о подводной освещенности в данном месте могут быть получены лишь путем непосредственного измерения с помощью фотометра или экспонометра.

Рассеяние света микрочастицами, взвешенными в воде, а также ее молекулами приводит к снижению прозрачности воды и вызывает образование подводного тумана, аналогичного воздушной дымке в атмосфере, но в 1000 раз более интенсивно. Поэтому горизонтальная видимость в воде примерно на 40% меньше, чем глубина видимости по вертикали сверху.

В зависимости от количества и характера взвесей подводный туман имеет голубоватый или зеленоватый оттенок. В мутной воде этот туман бывает желтого или коричневатого цвета.

Свет, рассеянный водой, снижает физический интервал яркостей, делает расплывчатыми контуры наблюдаемых и фотографируемых

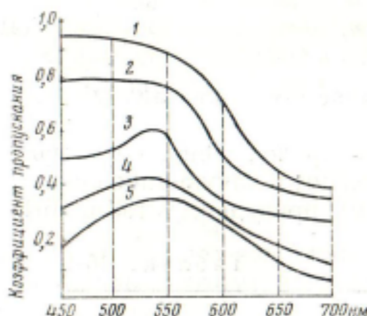


Рис. 16-3. Поглощение солнечного света 3-*м* толщей воды:
1 — чистая вода; *2* — океанская вода средней чистоты; *3* — прибрежная чистая вода; *4* — прибрежная вода средней чистоты; *5* — мутная вода

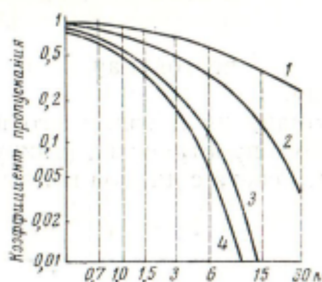


Рис. 16-4. Ослабление естественной освещенности под водой в зависимости от глубины погружения:
1 — чистая вода; *2* — океанская вода средней чистоты; *3* — прибрежная вода средней чистоты; *4* — мутная вода

на расстоянии подводных объектов, вуалирует фон и действует, как цветной светофильтр.

Подводный туман обнаруживает себя даже при съемках с близких расстояний (в 1—2 *м*). С увеличением расстояния между киноаппаратом и объектами съемки влияние подводного тумана усиливается, приводя в конце концов к полной неразличимости предметов, делает невозможным фотографирование под водой с больших удалений.

Подводный туман усиливается во много раз, когда водное пространство между киноаппаратом и объектами подводной съемки высвечено прямыми лучами света. В этом случае происходит то же, что и внутри помещения, в которое проникают прямые солнечные лучи, обнаруживающие запыленность воздуха и создающие туманную завесу. Если же в водной среде в пространстве между киноаппаратом и объектами съемки образуется участок тени, то через это затененное пространство видимость и условия съемки во много раз лучше. Поэтому наиболее эффективным способом преодоления подводного тумана является выбор такого места для съемки, где

имеется тень. Для создания тени используют лодку, плот, судно или развешивают тент над поверхностью воды.

Повышение контраста изображения возможно также с помощью применения цветного или поляризационного светофильтра.

Работа объектива в условиях подводной съемки. Чтобы понять особенности работы объектива в водной среде, преломляющая способность которой мало отличается от преломляющей способности стекла, необходимо обратиться к законам геометрической оптики.

Угол падения α и угол преломления β монохроматического луча света связаны соотношением

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \qquad (16\text{-}1)$$

где n — постоянная величина, называемая показателем преломления.

Значения абсолютного показателя преломления, когда свет из пустого пространства (вакуума) переходит в какую-либо среду (для лучей света с длиной волны $\lambda = 650$ *нм*), приведены в табл. 16-1.

Таблица 16-1

Прозрачная среда	Показатель преломления
Вакуум	1,0
Воздух	1,003
Вода	1,33
Стекло (легкий крон)	1,51
Стекло (тяжелый флинт)	1,74

Обычно измеряется показатель преломления различных прозрачных сред относительно воздуха, абсолютный показатель преломления которого равен 1,003.

Лучам света с различной длиной волны соответствуют разные показатели преломления, поэтому пучок белых лучей разлагается на лучи цветные. Это явление дисперсии света вызывает хроматическую аберрацию.

Теперь мы можем рассмотреть работу объектива в условиях подводной съемки.

Прежде всего констатируем факт: если передняя линза обычного объектива, рассчитанного для работы в воздушной среде, непосредственно соприкасается с водой, то сфокусировать изображение в киноаппарате не удастся, так как преломление света на границе вода — стекло незначительно и фокусное расстояние будет вследствие этого весьма большим. Получить резкое изображение можно, если между объективом и водой имеется воздушная прослойка и весь объектив находится в воздушной среде.

Киноаппарат, приспособленный для подводной съемки, помещают в водонепроницаемый бокс, который не только защищает механизм и кинопленку от воды, но и создает условия для работы объектива. В подводном боксе объектив расположен за окном с плоскопараллельным стеклом. Световые лучи от снимаемого предмета претерпевают преломление на границах вода — стекло и стекло — воздух, а затем уже из воздуха направляются в объектив.

Ввиду того что показатель преломления при переходе света из воды в стекло иллюминатора бокса незначителен, то при дальнейших расчетах им можно пренебречь и рассматривать как одно преломление на границе вода — воздух.

Преломление световых лучей при прохождении границы вода — воздух изменяет угол изображения объектива. Принимая показатель преломления для воды равным 1,33, а для воздуха — 1,0, по формуле закона преломления света получаем:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{1,33}{1}, \qquad (16\text{-}2)$$

откуда $\sin\beta = \frac{1}{1,33} \cdot \sin\alpha = 0,75 \cdot \sin\alpha.$

При малых углах величины их синусов и самих углов прямо пропорциональны, поэтому можно считать, что

$$\beta \approx 0,75\alpha. \qquad (16\text{-}3)$$

Следовательно, при подводной съемке угол изображения объектива, защищенного от воды плоскопараллельным стеклом, уменьшается до 0,75 той его величины, которую он имеет в условиях съемки в воздушной среде. Объектив, имеющий в воздушной среде угол изображения 40°, при подводной съемке охватывает подводное пространство лишь в пределах 30°. На рис. 16-5 приведен график, показывающий изменение углов изображения объектива в случае использования для подводной съемки через застекленное окно водозащитного бокса.

Наводку на фокус при подводной съемке нужно производить на 0,75 действительного расстояния. Например, когда объект съемки находится на расстоянии 4 *м* от киноаппарата, то установка по шкале должна быть сделана на 3 *м*.

При подводной съемке через застекленное окно нарушается коррекция объектива и ухудшается резкость изображения. Особенно заметна хроматическая аберрация, другие аберрации выявляются меньше. Астигматизм становится заметным при расстояниях наводки менее 2 *м*, дисторсия обнаруживается при углах изображения более 60°. Вполне резкое изображение получается только в центральной части кадра в пределах угла изображения приблизительно 30°.

Казалось бы, что простым способом исключения аберраций явилась замена плоского защитного стекла сферическим, имеющим концентрические поверхности. В этом случае световые лучи направляются в объектив без преломлений, сохраняя и угол изображения. Кроме того, сферическое стекло, находясь в контакте с водой, обра-

зует сильную вогнутую поверхность водной среды, которая действует как отрицательная линза. Имеющаяся на объективе шкала расстояний наводки не годится и в этом случае. Однако сферическое стекло в сравнении с плоским меньше нарушает коррекцию объектива.

Известный специалист по подводным исследованиям и киносъемкам Жак Кусто применяет в подводном боксе окно в виде отрицательного мениска, у которого радиус кривизны внутренней поверхно-

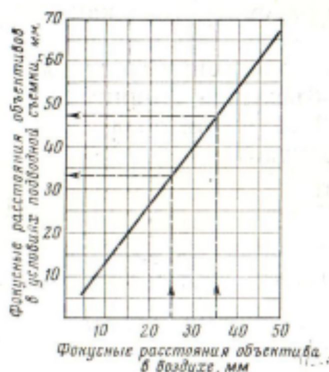


Рис. 16-5. Изменение фокусного расстояния объектива при подводной съемке

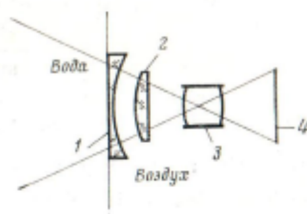


Рис. 16-6. Оптическая схема корригирующей системы: 1 — плоско-вогнутая линза; 2 — плоско-выгнутая линза; 3 — объектив; 4 — пленка

сти меньше, чем наружной. Такое окно рассчитано только для одного фокусного расстояния объектива. При смене объектива необходимо заменить и окно бокса рассчитанным для него мениском.

На рис. 16-6 приведена оптическая схема корригирующей системы А. Иванова, исправляющей эффект подводного увеличения и сохраняющей угол поля изображения объектива таким же, как при съемке в воздухе. Так же исправляются и другие недостатки плоского окна: дисторсия, астигматизм, сферическая и хроматическая аберрации. Эта система состоит из двух линз: первой — отрицательной, второй — положительной. Передняя линза является окном подводного бокса, ее фронтальная плоская поверхность граничит с водой. Вторая линза находится внутри бокса на некотором расстоянии от первой. Центрирование системы относительно объектива кинокамеры может быть не очень строгим: допусти́м эксцентриситет в несколько десятых миллиметра. Расстояние корригирующей системы до объектива кинокамеры может меняться в любую сторону в пределах нескольких миллиметров без вреда для изображения, так как система афокальная. Может только возникнуть виньетирование при слишком большом удалении от объектива.

В последнее время созданы специальные «подводные» объективы, рассчитанные для съемки только в водной среде; они не могут

работать в воздухе. Передняя линза такого объектива непосредственно соприкасается с водой. Подводные объективы корригированы как в отношении аберраций, так и увеличения.

Наиболее известны подводные объективы «Элкан» канадского отделения фирмы «Лейтц», а также японской фирмы «Никон».

Подводный объектив «Элкан» имеет фокусное расстояние 15,3 *мм,* относительное отверстие 1:2,8, угол поля изображения 76°.

Хорошие результаты получают с помощью специальных корригирующих оптических насадок, выполняющих одновременно роль иллюминатора; они рассчитываются для исправления аберраций и одновременно оставляют угол изображения объектива без изменений. Расстояние наводки на фокус по шкале дистанций на объективе соответствует действительному расстоянию в воде от киноаппарата до объекта съемки. Такие системы не требуют строгого совмещения с оптическим центром объектива.

В Советском Союзе изготовляются рассчитанные М. М. Русиновым специальные объективы для подводных съемок через иллюминатор, получившие название «Гидроруссар». Расчет объективов «Гидроруссар» произведен с учетом искажений, вносимых водой и плоскопараллельным стеклом иллюминатора; аберрации для условий подводной съемки почти полностью устранены. Объектив «Гидроруссар-5», наиболее подходящий для киноаппарата, имеет фокусное расстояние 19,5 *мм,* относительное отверстие 1:4.

Киноаппаратура для подводных съемок. Кинооператору, спускающемуся в воду с аквалангом или в водолазном снаряжении, необходим герметизированный киноаппарат. Водонепроницаемый кожух для киноаппарата принято называть подводным боксом. Такой бокс должен надежно защищать киноаппарат от воды и обеспечивать возможность производства киносъемки: визирование кадра, наводку объектива на фокус, установку диафрагмы, пуск и остановку электродвигателя; для аппаратов с пружинным приводом — также подзаводку пружины.

Конструкция подводного бокса зависит от типа киноаппарата и рассчитанной глубины, на которой может производиться съемка. Каждая конструкция подводного бокса для киноаппарата должна отвечать следующим общим требованиям: быть достаточно прочной, а соединения вполне герметичными для того, чтобы выдерживать гидростатическое давление при погружении в воду на расчетную глубину. Большое значение для удобства работы под водой имеют форма и размеры бокса. Всегда желательно, чтобы наружные размеры бокса были бы минимальными, а форма обтекаемой, не создающей большого лобового сопротивления при передвижении в воде.

При небольшой положительной плавучести бокс с киноаппаратом должен быть сбалансирован так, чтобы оптическая ось объектива легко устанавливалась в горизонтальное положение; все рукоятки достаточно большими и удобными для управления с их помощью киноаппаратом. Счетчик метров снятой или неизрасходован-

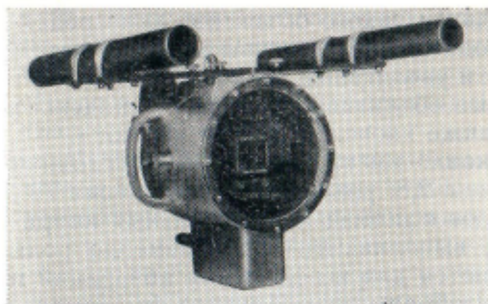


Рис. 16-7. Подводный бокс для киноаппарата «Конвас-автомат»

ной кинопленки и указатель частоты съемки должны быть хорошо видны. Наконец, весьма важно, чтобы поверхность и все детали бокса, соприкасающиеся с водой, были хорошо защищены от коррозии в условиях воздействия воды и воздуха.

На Центральной киностудии документальных фильмов (ЦСДФ) под руководством кинооператора Ф. А. Леонтовича разработаны подводные боксы для киноаппарата «Конвас-автомат». Одна из ранних моделей бокса ЦСДФ (рис. 16-7) изготовлена из винипласта. Этот бокс имеет форму шара, соединяемого из двух полусфер; в передней части имеется окно с плоскопараллельным стеклом и выведенные наружу рукоятки для фокусирования объектива и установки диафрагмы; в задней — окуляр визирной лупы, пусковая кнопка и окно, через которое виден тахометр и указатель количества кинопленки в кассете.

Подводный бокс новой модели — алюминиевый литой. Киноаппарат «Конвас-автомат», помещаемый в этот бокс, снабжен специальной 120-*м* кассетой. Кадр визируется по матовому стеклу через обычную систему с зеркальным обтюратором. На корпусе бокса может быть установлен дополнительный рамочный визир. Серебряно-цинковые аккумуляторы расположены в приливе в нижней части бокса. К верхней части крепятся два поплавка цилиндрической формы, позволяющие регулировать дифферент бокса. Наружу через сальники выведены рукоятки фокусирования и диафрагмирования объектива. Пусковая кнопка расположена в нижней части бокса. В аппарат можно устанавливать различные объективы и анаморфотную насадку. Бокс с киноаппаратом имеет положительную плавучесть 250—300 *г*. Бокс ЦСДФ рассчитан для съемки документальных фильмов на глубине до 20 *м*.

На ЦСДФ были разработаны и изготовлены подводные боксы для панорамного киноаппарата.

На рис. 16-8 показан подводный бокс ВНИРО, получивший наименование «Дельфин-5».

Этот подводный бокс — универсальный; в него можно помещать разные киноаппараты: «Конвас-автомат» в обычном варианте, «Конвас-автомат» с анаморфотной насадкой для съемок широкоэкранных фильмов, широкоформатный киноаппарат 1-КСШР для 70-*мм* кинопленки, 16-*мм* скоростной киноаппарат и ряд других специальных киноаппаратов.

Конструкция бокса позволяет производить под водой наводку объектива на фокус и диафрагмирование, а также изменение часто-

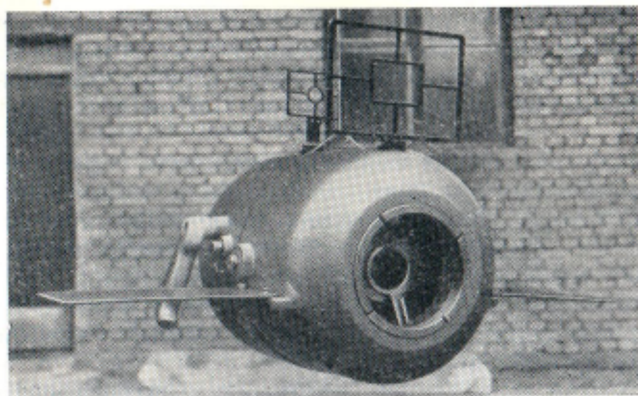


Рис. 16-8. Подводный бокс «Дельфин-5»

ты съемки. В аппарате «Конвас-автомат» можно устанавливать объективы с фокусным расстоянием 16, 18, 22, 28 и 35 *мм*. В широкоэкранном варианте применяются объективы с фокусным расстоянием 35 и 50 *мм*. Съемки широкоформатным аппаратом 1-КСШР производятся объективами с $f = 28$ и 40 *мм*.

Установка в бокс киноаппаратов различных типов осуществляется посредством специального кронштейна. На кронштейне смонтированы валы с шестернями, входящими в зацепление с шестернями, надетыми на кольца фокусирующей оправы объектива и диафрагмы.

Аккумуляторная батарея помещается внутри бокса. У левой ручки расположен выключатель электродвигателя аппарата, а у правой — реостат, изменяющий скорость съемки. Наводка на фокус может производиться по шкалам на рукоятке управления фокусирующей оправы объектива или по матовому стеклу через визирную систему киноаппарата. Окуляр визирной лупы примыкает к смотровому окну на задней стенке крышки бокса. Через такие же окна видны шкалы указателя количества кинопленки в кассете и указателя частоты съемки. На боксе крепится дополнительный рамочный визир. К нижней части бокса крепятся крылья-стабилизаторы.

Бокс рассчитан для работы на глубине до 300 *м*. При погружении на глубину более 75 *м* используется пневматическая система, противодействующая давлению воды. Автомат, подобный легочному автомату акваланга, регулирует подачу сжатого воздуха внутрь подводного бокса. Баллон со сжатым воздухом и автомат смонтированы у нижней части бокса. При всплытии, когда давление внутри бокса становится больше наружного давления воды, излишний воздух выходит через выходной клапан автомата. Масса бокса с киноаппаратом под водой регулируется съемными грузами. Для съемки устанавливается нулевая плавучесть, а при подъеме на поверхность — положительная.

Осветительное оборудование для подводных киносъемок. При киносъемке под водой часто применяют искусственное освещение, а при глубоководной киносъемке искусственное освещение совершенно необходимо из-за чрезвычайно слабой естественной освещенности.

На небольшой глубине можно использовать софиты с открытой лампой накаливания; от воды должны быть изолированы только токоведущие части. Для включения ламп подводного освещения изготовляются специальные герметизированные патроны, представляющие собой толстостенный резиновый цилиндр, оканчивающийся с обеих сторон эластичными манжетами; один из них плотно облегает цилиндрическую часть колбы лампы, а другой — обжимает электрический кабель.

Герметически защищенное соединение электрокабеля с лампой можно осуществить простым способом. Для этого нужно припаять концы кабеля к цоколю электролампы, поместить цоколь с припаянными проводами в отрезок трубы из пластмассы и залить электроизоляционной массой. В качестве изоляционной массы используют парафин или битум, смешанный с канифолью и машинным маслом. К 1 *кг* битума нужно добавить 1 *кг* канифоли и 400 *г* машинного масла.

Колбы обычных ламп накаливания из тонкого стекла могут выдерживать значительное давление, их можно погружать на глубину 20 *м* и более. Для работы на больших глубинах изготовляются специальные лампы типа СЦ-82 (1000 *Вт*) и СЦ-83 (1500 *Вт*) из особопрочного стекла; их можно погружать на глубину до 200 *м*.

Лампы помещают в софит самого простого типа. Источник питания (аккумулятор) находится в лодке или его можно поместить в водонепроницаемый бокс с герметизированным выводом кабеля.

Для киносъемок под водой могут быть использованы также осветительные приборы, которые предназначены для водолазных работ, например ППС-1000 с лампой СЦ-82 или СЦ-83, вмонтированной в хромированный металлический отражатель. В этом приборе герметизированы только токонесущие части, а лампа и отражатель свободно омываются водой. Имеются подводные прожекторы, в которых лампа и отражатель помещены в водонепроницаемый корпус.

На ЦСДФ разработан прожектор для киносъемки. Для питания лампы-фары используется батарея малогабаритных серебряно-цинковых аккумуляторов, помещенная в корпус цилиндра с лампой и отражателем. Длина цилиндра 110 *см*, диаметр 20 *см*.

У подводного прожектора с ксеноновой лампой она, отражатель и батарея серебряно-ртутных аккумуляторов, а также высоковольтное устройство для зажигания лампы заключены в такой же водонепроницаемый бокс, какой используется для подводного киноаппарата.

Чтобы создать условия автономности кинооператору, то есть независимости от помощников-осветителей, осветительные приборы прикрепляют к киноаппарату.

На рис. 16-9 показана киноторпеда французского инженера Д. Ребикова. В носовой части этой киноторпеды смонтирован осветитель, а в задней части — гребной винт для облегчения ее передвижения под водой. Внутри цилиндрического корпуса размещены аккумуляторы для питания электролампы, электродвигателя киноаппарата и электродвигателя, вращающего гребной винт. Емкость аккумуляторной батареи обеспечивает работу осветительного устройства и электродвигателей в течение 20 *мин*.

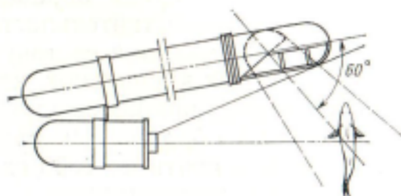


Рис. 16-9. Киноторпеда Д. Ребикова

Другое конструктивное оформление осветительных устройств имеет подводный киноаппарат «Гольсон-2000» (США). Два подводных прожектора прикреплены к киноаппарату на шарнирных кронштейнах. Питание электроламп и электродвигателя киноаппарата производится от аккумуляторов, находящихся в подводном боксе киноаппарата.

ПРАКТИКА ПОДВОДНЫХ КИНОСЪЕМОК

Выбор объектива. Лучшей возможностью избежать действия подводного тумана будет съемка широкоугольным объективом при минимальном расстоянии между киноаппаратом и снимаемыми объектами.

Выбор кинопленки. Высокочувствительные черно-белые кинопленки, как правило, имеют пологий нижний участок характеристической кривой и хуже воспроизводят малоконтрастное изображение. Поэтому может быть целесообразным использовать кинопленку наименьшей светочувствительности, какую только допускают условия освещения, чтобы путем увеличения времени проявления получить более контрастное изображение. Следует учитывать также, что чем ниже светочувствительность кинопленки, тем мельче эмульсионное зерно. Это является важным фактором качества фотографического изображения.

Другой способ заключается в прямом усилении контраста изображения с помощью специальной особоконтрастной ($\gamma=4{,}5$—5) высокочувствительной ортохроматической кинопленки. В этом случае съемка производится без светофильтра.

Что касается цветной кинопленки, то, как при дневном освещении, так и дневном освещении с искусственной подсветкой, следует отдать предпочтение кинопленке типа ДС, чувствительность которой к коротковолновой зоне понижена. Если же использовать цветную кинопленку типа ЛН, необходимо будет применить весьма плотный светофильтр, чтобы подавить цвет голубого или зеленовато-голубого подводного тумана.

Для подводной киносъемки на больших глубинах, где дневного света почти или совсем нет, а объекты освещаются только светом ламп накаливания, следует применять цветную кинопленку типа ЛН.

В настоящее время обращаемые цветные кинопленки имеют бо́льшую светочувствительность, чем негативные цветные кинопленки. Максимальная светочувствительность современных цветных негативных кинопленок, как отечественных, так и зарубежных, ограничивается приблизительно 100—120 ед. ГОСТ. Светочувствительность же обращаемых цветных кинопленок можно повысить до шести раз, почти до 1000 ед. ГОСТ, путем форсированного проявления при незначительном нарушении цветовоспроизведения. Поэтому для подводных киносъемок на больших глубинах предпочтительнее использовать обращаемую цветную кинопленку.

Определение экспозиции. Для работы под водой обычный фотоэлектрический экспонометр помещают в водонепроницаемый бокс. Управление подвижным диском калькулятора осуществляется рукояткой, выведенной через сальник наружу бокса.

Поскольку обычные экспонометры градуированы в расчете на средний дневной свет, его показания под водой могут быть неточными вследствие того, что спектральный состав света, проникающего в воду, отличается от среднего дневного — в нем отсутствуют лучи длинноволновой зоны. Поэтому необходимо сделать ряд пробных съемок и определить величины поправок в показания экспонометра для разной глубины. При этом целесообразно установить перед фотоэлементом выбранный для съемки светофильтр.

Применение светофильтров при черно-белой съемке. Главная трудность при черно-белой съемке под водой — преодоление подводного тумана для придания четкости фотографическому изображению.

Так как подводный туман имеет сине-голубой или зелено-голубой цвет, то применяют желтые светофильтры различной плотности. Желтые светофильтры поглощают лучи синие и голубые и частично зеленые; в то же время свободно пропускаемые ими красные, оранжевые и желтые лучи поглощаются водой. Поэтому применение светофильтра может потребовать увеличения экспозиции в десять и более раз.

Кратность светофильтра зависит от глубины и цвета воды, она различна для одного и того же светофильтра в зависимости от этих факторов. Чтобы определить кратность того или иного светофильтра в подводных условиях, нужно сделать пробные съемки.

В определенных условиях положительные результаты может дать поляризационный светофильтр, так как при рассеянии водой свет поляризуется. Трудность применения поляризационного светофильтра заключается в том, что его необходимо ориентировать таким образом, чтобы плоскость его поляризации была перпендикулярна плоскости поляризации света. Лучше всего устанавливать

поляризационный светофильтр под водой, глядя сквозь него на снимаемый объект и поворачивая до тех пор, пока не будет достигнуто наибольшее притемнение, и тогда в таком же положении укрепить его перед иллюминатором подводного бокса киноаппарата. Кратность поляризационного светофильтра бывает разной — от 4 до 8 крат.

Применение светофильтров при цветной съемке. При съемке на цветную кинопленку под водой коррекция цвета имеет гораздо более важное значение, чем устранение подводного тумана.

Многие кинооператоры, работавшие на глубине 9—12 *м*, отмечают, что, несмотря на отсутствие там красных лучей рыбы и вся морская растительность образуют весьма живописную цветную картину, содержащую желтые, синие, ярко-зеленые и множество промежуточных цветных тонов.

Цветная кинопленка способна достаточно хорошо передавать в изображении почти все цвета, которые встречаются в природе. Однако если полностью положиться только на цветную кинопленку и снимать под водой при солнечном освещении, не принимая во внимание рассеивающего и фильтрующего действия водной среды, то в фотографическом изображении будет преобладать однотонный зеленовато-голубой или желтовато-зеленый цвет, который подавляет все другие цветные оттенки. Лишенные цветового контраста изображения подводных объектов теряют свои очертания, растворяясь по мере удаления в подводном тумане.

Причина того, что человек обнаруживает под водой большое разнообразие цветных оттенков, а цветная кинопленка регистрирует лишь зеленовато-голубой или желто-зеленый цвет, кроется не только в кинопленке. Красители желтого, пурпурного и синего цвета, из смешения которых образуются все промежуточные цветные оттенки, образуются в трех слоях многослойной кинопленки пропорционально полученным количествам световой энергии соответствующих длин волн. Подавляющий все другие цвета сине-зеленый цвет может образоваться в цветной кинопленке только тогда, когда именно этот цвет преобладает в снимаемом объекте, а кинопленка регистрирует действительное соотношение цветных тонов.

Иначе обстоит дело при непосредственном восприятии человеком действительного объекта в естественных условиях. Глаз и мозг могут отбирать и «отфильтровывать» цветные тона гораздо более действенно, чем цветная кинопленка. В конкретных условиях наш глаз подсознательно регулирует соотношение чувствительности своих светоприемников так, что он становится по своему действию как бы нулевым прибором, показывающим отклонения каждого участка объекта от средней яркости и цвета объекта в целом. Так, цвет белой бумаги воспринимается нами одинаково белым при разном по спектральному составу освещении, как при свете свечи, так и при дневном свете в тени деревьев. Кинопленке такая способность не присуща, и она точно фиксирует физический цвет. На кинопленке, сбалансированной к среднему дневному свету с цветовой тем-

пературой 5500 К, белая бумага изобразится правильно белым цветом, но при свете свечи, когда цветовая температура соответствует примерно 1900 К, белая бумага будет воспроизведена красно-оранжевым цветом. Естественно, что та же белая бумага при освещении зелено-голубым светом, который имеется в водной среде на глубине 9—12 *м*, получится зелено-голубой.

Цветное изображение с такою же насыщенностью цветных тонов, какими их видит человек под водой, можно получить только путем применения светофильтров. Таким образом, правильное воспроизведение цвета в цветном фотографическом изображении, снятом под водой, зависит от правильного подбора цветного светофильтра, применительно к конкретным условиям.

Описывая фильтрующее действие воды, мы уже говорили о том, что спектральное пропускание воды неодинаково для разных мест. Светофильтр для подводной киносъемки нужно выбирать такой, который поглощает свет той спектральной зоны, для которой вода в данном месте наиболее прозрачна.

Для определения цвета необходимого светофильтра применяют следующий простой способ. При пробном погружении берут с собой белую дощечку и рассматривают ее на расстоянии вытянутой руки или дальше. Если дощечка будет казаться сине-зеленой, то нужно применить светофильтр оранжево-красного цвета. Если же дощечка будет казаться желто-зеленой или желтой, а это указывает на то, что вода в данном месте поглощает не только красные, но и синие лучи, — следует применять светофильтры пурпурного цвета. Для этого могут быть использованы пурпурные светофильтры, предназначенные для корректировки цвета при печати цветных позитивов. Светофильтр, наиболее подходящий по плотности, кинооператор должен выбрать путем пробных съемок. Чем больше общая длина пути света в воде, тем плотнее должен быть светофильтр. Кратность светофильтра определяют также экспериментально.

Цветные светофильтры позволяют получать вполне приемлемые цветные фотографические изображения на глубине до 15 *м*, тогда как без них удовлетворительное цветовоспроизведение невозможно на глубине больше 5 *м*.

Светофильтры сильно уменьшают общее пропускание света, поэтому при недостаточной освещенности их применять не представляется возможным.

В заключение следует сказать, что бесполезно пытаться снимать под водой на цветную пленку в пасмурную погоду или когда солнце закрыто облаками, кроме как на очень малой глубине в прозрачной чистой воде.

Искусственное освещение подводных объектов. Водная среда в 1000 раз сильнее, чем воздушная, рассеивает свет. Если «затуманенное» водное пространство между киноаппаратом и снимаемыми объектами высветить, то это приведет к значительному уменьшению интервала яркостей. Поэтому источники освещения в воде

нужно устанавливать как можно ближе к снимаемым объектам, применяя боковое освещение, стараясь не высвечивать пространство между киноаппаратом и снимаемыми объектами.

Для подводных съемок в большинстве случаев необходим только один прибор рисующего света, так как вследствие сильного рассеяния света водной средой глубоких теней не образуется и надобность в источнике заполняющего света отпадает. Более того, повышение контраста бывает полезно для усиления различимости деталей снимаемых под водой объектов.

При искусственном освещении в воде туманная завеса образуется не только в результате рассеяния прямых лучей источника освещения, но и вследствие рассеяния света, отраженного от снимаемого объекта. Чем выше мощность освещения, тем интенсивнее яркость световой завесы.

Если при оптимальном расположении осветительных приборов для освещения подводных объектов увеличить их мощность в десять раз, то из-за одновременного усиления яркости световой завесы видимость под водой увеличится лишь на 15%. При подводной съемке усиление освещенности не приводит к улучшению четкости фотографического изображения. Поэтому искусственное освещение под водой должно быть минимальным, то есть достаточным только для того, чтобы проэкспонировать пленку.

Киносъемка в мутной воде, когда видимость не превышает долей метра, представляет сложную проблему. К сожалению, такие условия часто встречаются именно тогда, когда киносъемка необходима в научных или технических целях, например при работах по подъему затонувших судов, прокладке или обследованию трубопроводов, кабелей, опор мостов и т. п., а также при строительстве гидросооружений.

Преодолеть мутную среду и создать резкое оптическое изображение световые лучи не могут, поэтому применяют контейнер в виде усеченной четырехгранной призмы с прозрачным наполнением, который устанавливают между киноаппаратом и снимаемым объектом. Контейнер может быть наполнен водой или другой прозрачной жидкостью, например глицерином или бензином.

Воду применяют дистиллированную, так как «чистая» водопроводная вода содержит минеральные примеси, которые осаждаются на стенках, вызывая их помутнение. Такую воду приходится часто заменять, а стекла протирать. Или необходимо обрабатывать водопроводную воду алюминиевыми квасцами или формалином, что требует затраты времени и тормозит работу.

Контейнер, наполненный жидкостью, опускают в воду и подводят к объекту съемки. Проблема герметизации здесь отсутствует.

Съемка через контейнер, как правило, требует искусственного освещения. Для качества съемки очень большое значение имеет расположение источников света, так как нужно избежать образования бликов на стекле и рассеяния света внутри контейнера. Здесь могут быть применены лампы накаливания или импульсные лампы, синхронизированные с киноаппаратом.

Для такого рода съемок целесообразно брать черно-белую кинопленку максимальной контрастности. В ряде случаев необходимо применять желтый светофильтр.

Подводное телевидение. Возможности современной техники телевидения позволяют видеть происходящее в глубинах моря и вести непрерывное наблюдение, не опускаясь в воду.

Сидя на борту корабля перед экраном телевизора наблюдатель может видеть, что происходит на глубине, записывая те или иные детали на магнитную ленту. Все же для того, чтобы зафиксировать наблюдаемую картину, приходится применить киносъемку с экрана телевизора или видеозапись. Если подводная телевизионная камера дублируется киноаппаратом, для которого она служит дистанционным видоискателем, то можно снять непосредственно под водой наиболее важные наблюдения. Киноаппарат синхронизируют с электронно-импульсным осветителем, дающим повторяющиеся вспышки, соответствующие частоте киносъемки. Подводная телевизионная установка позволяет непрерывно наблюдать за работающими водолазами, чтобы давать им необходимые указания. Телевизионной аппаратурой оборудуются подводные телероботы. Один из таких автоматов, предназначенный для использования при разведке и бурении нефтяных скважин под водой, помимо телепередатчика имеет еще и киноаппарат.

У подводного телевидения имеются большие потенциальные возможности. Так, например, порог контрастной чувствительности у современных подводных телевизионных установок примерно такой же, какой и у человеческого глаза. Средства электроники позволяют во многих случаях избавиться от оптических искажений путем изменения определенным образом формы токов или напряжения развертки. Специальные электронные устройства — контрасторы — частично компенсируют затухание контраста, ослабевающего в воде.

Наибольшая дальность ви́дения под водой при помощи телевизионной аппаратуры уже достигла 45 *м*.

Глава 17

ВОЗДУШНАЯ КИНОСЪЕМКА

Воздушной называют киносъемку, выполняемую с летательных аппаратов любых видов: самолетов, вертолетов, планеров, аэростатов, дирижаблей, космических кораблей и др., а также киносъемку свободно падающим парашютистом-кинооператором своих коллег парашютистов, падающих одновременно с ним.

Объекты воздушных киносъемок могут быть как наземные, так и воздушные. При съемке событий, происходящих на земле, самолет, вертолет, аэростат используются в качестве средства операторского транспорта, позволяющего занять наиболее удобную верхнюю точку для съемки.

Другую группу объектов представляют самолеты, вертолеты и другие летательные аппараты, а также парашютисты, находящиеся в полете.

Диапазон скоростей полета летательных аппаратов очень большой. Возьмем к примеру самолеты. Некоторые типы легких самолетов связи и спортивные самолеты, совершающие взлет и посадку на малых площадках, летают со скоростью 60—140 *км/ч*. Транспортные самолеты с поршневыми или турбовинтовыми двигателями делают 250—550 *км/ч*. Реактивные «дозвуковые» транспортные самолеты, а также самолеты-бомбардировщики и учебные самолеты-истребители летают со скоростью, превышающей 1000 *км/ч*. Сверхзвуковые истребители и бомбардировщики достигают скорости 3000 *км/ч*.

При создании художественных кинофильмов на темы из истории авиации возникает необходимость снимать очень тихоходные старые самолеты. Вспомним фильм «Безумный, безумный, безумный мир», для которого снят взлет и полет самолета Дехевилэнд модели 1917 года, или фильм «Великолепные мужчины на летательных аппаратах», где прекрасно засняты полеты большого числа аэропланов постройки 1910 года.

Все воздушные киносъемки можно условно разделить на два вида. К первому относятся киносъемки, выполняемые кинооператором, находящимся на летящем аппарате и снимающим ручным

киноаппаратом, который дает ему возможность кадрировать изображение, а также выполнять наводку на фокус, установку диафрагмы, смену объективов и т. д.

Ко второму виду относят киносъемки, которые производятся автоматическими киноаппаратами, установленными в разных местах летательного аппарата и управляемыми дистанционно, чаще всего не кинооператором, а одним из членов экипажа самолета, вертолета или космического корабля. Дистанционное управление киноаппаратом может осуществляться также по сигналам программного устройства, находящегося на летательном аппарате или принимающего команды по радио.

Для воздушных киносъемок применяют как обычную, так и специальную авиационную киноаппаратуру.

Воздушная киносъемка применяется при создании художественных, документальных, научно-популярных и учебных кинофильмов.

Влияние метеорологических условий на воздушную киносъемку. Облачность и дальность видимости определяют выбор кинопленки и светофильтров. Наилучшими метеорологическими условиями не всегда является полное отсутствие облачности. Наоборот, такие условия могут оказаться совершенно неудовлетворительными. Например, самолеты на фоне чистого голубого неба выделяются очень плохо или почти совсем сливаются с фоном. Для съемки таких объектов всегда желательна хотя бы небольшая облачность. Присутствие кучевых облаков не только повышает различаемость воздушных объектов, но и помогает созданию динамики в кадре, так как облака являются неподвижными ориентирами в пространстве, по отношению к которым обнаруживается движение снимаемого воздушного объекта. Для киносъемки наземных объектов с воздуха наилучшими метеорологическими условиями во многих случаях является ясная безоблачная погода.

На работу механизмов киносъемочного аппарата оказывают влияние температура и влажность окружающей атмосферы. При низкой температуре возникает необходимость в электрообогревательном устройстве для киноаппарата.

Предельные значения температуры у земли доходят до +45°С летом, а зимой до —50°С. Поэтому авиационные киносъемочные аппараты независимо от того, на каких высотах предполагается их использование, должны иметь электрообогревательные устройства, обеспечивающие их безотказную работу в пределах указанных температур.

При быстром снижении самолета и переходом его в слои с более высокой температурой и большей влажностью воздуха может произойти запотевание объектива. При полетах в сложных метеорологических условиях иногда наступает обледенение киноаппарата. Через запотевшее защитное стекло контейнера киноаппарата невозможно получить четкое изображение на кинопленке.

Обледенение происходит чаще зимой, реже летом. Зимой условия, благоприятствующие обледенению, возникают при прохожде-

нии теплого воздушного фронта. Летом обледенение возможно при полетах на высоте 2500—3000 *м* в облаках, особенно в кучевых. Причиной обледенения в этом случае являются капельки воды, замерзающие при резких колебаниях температуры в сильном потоке холодного воздуха.

Автоматические киносъемочные аппараты, установленные снаружи и обращенные объективами вперед по полету, наиболее подвержены обледенению. Для борьбы с обледенением устанавливают перед объективом киноаппарата защитное стекло с электрообогревательной сеткой, впаянной внутри стекла.

При полетах со сверхзвуковыми скоростями возникает обратное явление — сильный нагрев наружной поверхности самолета вследствие трения о воздух. Поэтому киносъемочные аппараты, рассчитанные для применения на сверхзвуковых самолетах, должны обеспечивать работоспособность не только при низких, но также и при высоких температурах.

Необходимо учитывать, что при низкой температуре светочувствительность кинопленки уменьшается, а при высокой — быстро увеличивается вуаль.

Преодоление воздушной дымки и увеличение контрастности изображения при воздушной киносъемке достигается с помощью светофильтров. При черно-белой съемке на малых и средних высотах (до 10 000 *м*) применяют светофильтры ЖС-17 и ЖС-18. На больших высотах, где воздух прозрачнее, а небо имеет темно-синий цвет, применяют светло-желтый светофильтр.

Совершенно иначе обстоит дело при киносъемке наземных объектов даже со средних высот. Для преодоления воздушной дымки в этом случае необходимы густые желтые или оранжевые светофильтры, а в ряде случаев даже красные.

Для воздушных киносъемок, как правило, целесообразно использовать панхроматические кинопленки, обладающие повышенным контрастом. Негативы следует проявлять до $\gamma = 0{,}9—1{,}15$.

Воздушная дымка может быть в некоторых случаях успешно преодолена с помощью поляризационного светофильтра при условии, что угол между лучами света, освещающими объект съемки, и оптической осью объектива киноаппарата равен 90°.

Цветная воздушная киносъемка при небольших расстояниях до объекта производится на обычные цветные негативные кинопленки типа ДС или ЛН (с конверсионным светофильтром). Для киносъемки с больших удалений, особенно наземных объектов, целесообразно применять цветные кинопленки с повышенным контрастом. При воздушных киносъемках на обращаемые цветные кинопленки необходимо применять конверсионные светофильтры, которые устраняют голубой оттенок, вызываемый воздушной дымкой.

Экспонометрия при воздушной киносъемке. Одной из особенностей воздушной киносъемки является необходимость панорамирования для сопровождения движущегося объекта съемки. Например, самолеты, выполняющие пилотажные фигуры, парашютисты, поки-

дающие самолет, или падающие с самолета грузы при начале съемки кинокадра могут находиться на фоне синего неба, затем переходить на очень светлый горизонт и далее на фон земли с тенями от облаков, оказывающийся иногда очень темным. Таким образом, в течение съемки одного кадра необходимо менять экспозицию, чтобы получить ровный по плотности негатив, пригодный для печати на одном номере копировального света. Однако при съемке ручным киноаппаратом перестановка диафрагмы объектива практически очень редко осуществима, поэтому печать некоторых кадров воздушных съемок приходится производить с несколькими переключениями копировального света.

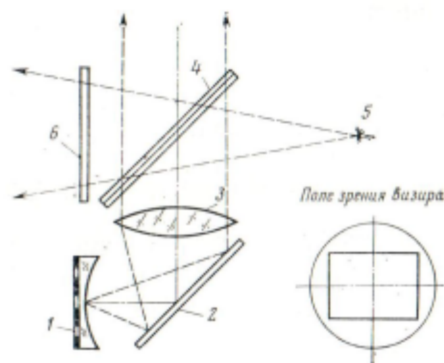


Рис. 17-1. Оптическая схема коллиматорного визира

Автоматическое регулирование диафрагмы объектива при воздушных киносъемках крайне желательно, а в ряде сложных случаев необходимо. В настоящее время имеются авиационные киносъемочные аппараты, в которых установка правильного раскрытия диафрагмы осуществляется автоматически.

Система автоматического регулирования экспозиции совершенно необходима для киносъемочных аппаратов, устанавливаемых на самолетах и других кораблях и включаемых дистанционно.

Когда воздушный кинооператор снимает ручным киноаппаратом, ему трудно пользоваться экспонометром, если последний не входит в конструкцию киноаппарата или хотя бы не прикреплен к киноаппарату. Если все же имеется возможность воспользоваться экспонометром, то определение правильной экспозиции следует производить по способу замера суммарной яркости снимаемой сцены.

Киноаппараты для воздушных съемок. Авиационные киносъемочные аппараты можно разделить на два типа: ручные и стационарные.

Ручной авиационный киносъемочный аппарат отличается от ручного хроникального киноаппарата тем, что он может быть подключен непосредственно к бортовой сети самолета или вертолета. Кроме того, он оснащен визиром коллиматорного типа, который предоставляет кинооператору большие удобства при воздушных киносъемках.

Преимущества коллиматорного визира заключаются в том, что он образует светящуюся кадровую рамку в бесконечности, изображение которой как бы накладывается на снимаемый объект, не

ограничивая поля зрения глаза и не изменяя масштаба изображения, наблюдаемого через визир.

Оптическая схема коллиматорного визира изображена на рис. 17-1. Стеклянная пластинка *1* покрыта непрозрачным слоем, в котором прочерчены прозрачные линии, образующие контуры визирных рамок, соответствующих углам охвата разных объективов. Свет, падающий на пластинку с рамками, проходит сквозь прозрачные линии и отражается зеркалом *2* в объектив *3*. Так как пластинка с рамками расположена точно в главной фокальной плоскости объектива *3*, то изображаемые им светлые линии рамок оказываются в ∞. Над объективом под углом 45° расположено полупрозрачное зеркало *4*, отражающее часть света в направлении глаза наблюдателя *5*, который видит линии рамок находящимися как бы в ∞. Одновременно ему виден через полупрозрачное стекло и объект съемки. Аккомодации глаза при этом не происходит, так как объект и линии рамки находятся практически в ∞. При съемке объектов, расположенных на ярко освещенном фоне, например самолеты на фоне облаков, перед полупрозрачным зеркалом устанавливается нейтрально-серый светофильтр *6*, который снижает яркость объекта и делает лучше видимыми линии рамок визира.

Коллиматорный визир несвободен от параллакса, компенсация которого осуществляется обычным способом путем конвергенции с оптической осью объектива. При воздушных киносъемках компенсация параллакса визира не требуется, так как снимаемые объекты находятся на значительном удалении от киноаппарата (во всяком случае не ближе 5—10 *м*).

Авиационные киноаппараты стационарного типа предназначаются для установки на самолеты и другие летательные аппараты как в наружных подвесных контейнерах, так и внутри кабин и всевозможных отсеков.

Киноаппараты этого типа часто используются в сложных условиях полета, поэтому их работоспособность должна быть обеспечена в широком диапазоне температур, при больших перегрузках и в условиях продолжительных вибраций.

Важным элементом стационарного авиационного киносъемочного аппарата является так называемый временно́й механизм, который служит для того, чтобы после кратковременного нажатия на пусковую кнопку киноаппарат продолжал съемку в течение заданного времени и затем автоматически выключался. Такая элементарная автоматика необходима потому, что включение киноаппарата производится, как правило, не кинооператором, а летчиком, основное внимание которого сосредоточено на пилотировании самолета.

Так как наведение неподвижно установленного на самолете киноаппарата на объект съемки производится в полете с помощью самолетного прицела, необходимо на земле до полета произвести «пристрелку», то есть установить его точно по отношению к линии визирования самолетного прицела.

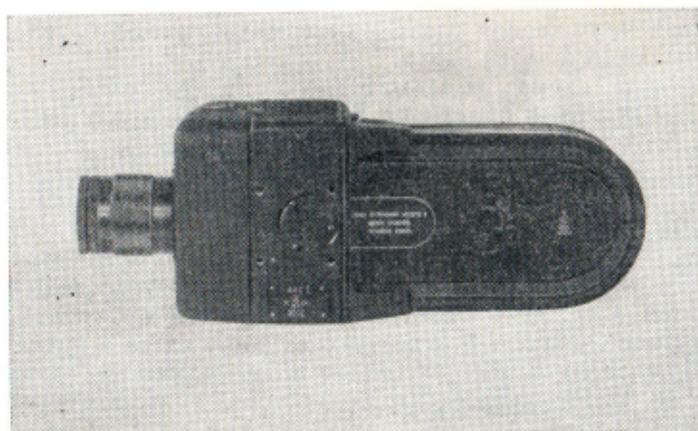


Рис. 17-2. Авиационный киносъемочный аппарат АКС-2

Для этих целей в комплекте стационарного авиационного киноаппарата имеется специальная визирная трубка, которая устанавливается на время выполнения «пристрелки» на место съемочного объектива.

Запас кинопленки в стационарном киноаппарате часто оказывается недостаточным, а перезарядку можно произвести только на земле. Но каждый взлет и посадка современного скоростного самолета стоит дорого. Реальный путь решения проблемы заключается в использовании узкой кинопленки, что дает возможность увеличить продолжительность киносъемки без перезарядки кассет.

Авиационный киносъемочный аппарат АКС-2 (рис. 17-2) может применяться как в стационарном, так и в ручном вариантах. Аппарат рассчитан на 35-*мм* кинопленку. Размеры кадрового окна 16×22 *мм*. Габариты и форма киноаппарата АКС-2 благоприятны для размещения в обтекаемом контейнере наружной подвески. При перезарядке аппарата кассета с кинопленкой вдвигается в аппарат одним движением. Лентопротяжный механизм, кроме грейфера, находится в кассете. Запас кинопленки в кассете 60 *м*. Частота съемки 24 или 48 *кадр/с*. Обтюратор дисковый с постоянным раскрытием 120°. В комплекте имеются четыре сменных объектива (f=35, 50, 135 и 210 *мм*). Способ визирования кадра при съемке с рук — через коллиматорный визир; при пристрелке в стационарной установке — через пристрелочный визир, который устанавливается взамен объектива. Командное устройство для автоматической киносъемки (временно́й механизм) выключает киноаппарат только после прохождения 5, 10, 15 или 30 *м* кинопленки после начала съемки. В аппарате имеются часы с центральной секундной стрелкой, циферблат которых фотографируется на кинопленку на месте звуковой дорожки против междукадрового промежутка.

Аппарат АКС-2 может работать при перегрузке до $\pm 7,5\,g$ и в пределах температур от $+50$ до -50°С. Электрообогрев автоматически включается при 0° и выключается при $+30$°С. Кроме того, имеется утеплительный чехол для аппарата. Напряжение электропитания киноаппарата 24 *В* постоянного тока.

Авиационный киносъемочный аппарат АКС-4 предназначен для съемки с рук на 35-*мм* кинопленку с частотой от 8 до 48 *кадр/с*. Частота съемки регулируется реостатом на электродвигателе и контролируется по тахометру. Размеры кадрового окна 16×22 *мм*. Кассеты рассчитаны на 60 и 120 *м* кинопленки. В комплекте имеется пять объективов ($f=35$, 50, 85, 135 и 210 *мм*). Обтюратор зеркальный двухлопастный с открытым сектором 60°. Ввиду того что обтюратор делает поворот только на 180° за один полный цикл работы грейфера, экспозиция рассчитывается для угла 120°. Визирование кадра может производиться по матовому стеклу через визирную лупу с увеличением 7,5 крат или через коллиматорный визир с полем зрения 66°; ограничительные рамки, соответствующие всем объективам комплекта, содержатся в поворотном диске. В корпусе аппарата имеются электронагревательные элементы, которые включаются и выключаются автоматически. Благодаря электрообогреву киноаппарат АКС-4 может работать в пределах температур от $+50$ до -50°С. Напряжения электропитания аппарата соответствуют самолетному (24 *В* постоянного тока).

Узкопленочный авиационный киносъемочный аппарат КВ-19А фирмы «Фотосоникс» (США) рассчитан на 16-*мм* кинопленку. Аппарат имеет кассеты на 30, 60 и 120 *м* кинопленки. Лентопротяжный механизм находится в каждой кассете. Частота киносъемки: 24, 32, 48, 64 и 200 *кадр/с*. При включенном временнóм механизме с подачей одного короткого импульса аппарат автоматически продолжает снимать в течение 5, 10 или 15 *с*. Обтюратор в аппарате дисковый с переменным раскрытием от 5 до 160°. Объектив $f=75$ *мм*, 1 : 2,8. Экспозиционная автоматика учитывает светочувствительность кинопленки, частоту съемки, кратность светофильтра и яркость снимаемого объекта. Все эти данные кодируются на кассете. При вставлении кассеты в аппарат экспозиционные данные вводятся в автоматическое устройство. Электрообогрев аппарата также автоматически регулируется, обеспечивая работоспособность киноаппарата при температуре от $+50$ до -50°С. Киносъемка может производиться при перегрузках до $\pm 4\,g$ и вибрациях от 5 до 500 колебаний в секунду по всем осям.

Киносъемка с самолетов ручным киноаппаратом. Всего четверть века назад воздушные киносъемки производились без особых трудностей. Высоты и скорости полета самолетов были небольшими, кинооператор мог находиться в кабине с открытым фонарем. А некоторые типы самолетов в то время не имели фонаря, а лишь защитный козырек. Можно было снимать ручным киноаппаратом или стационарным киноаппаратом, укрепленным с помощью различных приспособлений к пулеметной турели или бортам кабины.

С ростом скорости и высоты полета самолетов воздушные киносъемки усложнились. Кабины стали закрываться фонарями, а затем и герметизироваться. Чрезвычайно усложнилась конструкция кабины самолета, и все ее пространство заполнилось приборами и оборудованием. Появились сложные сиденья с катапультным креслом.

Поместить кинооператора с аппаратом в современный скоростной маневренный самолет стало очень трудно. В многоместных самолетах съемка в воздухе ручным киноаппаратом может производиться без значительных затруднений.

Только хорошо подготовленному физически кинооператору, имеющему определенный опыт, возможно выполнение воздушных киносъемок ручным киноаппаратом с современных сверхзвуковых самолетов во всем диапазоне высот и скоростей полета. Один опыт кинооператора еще не дает гарантии выполнения киносъемки в воздухе, где кинооператор зависит от летчика, а весь экипаж — от многих случайностей. Хорошо подготовленный экипаж может выполнить киносъемку в воздухе при условии соблюдения мер безопасности — первейшего требования ко всем участникам полета, а также лицам, обслуживающим самолет на земле и подготавливающим самолет и всю аппаратуру, в том числе и киносъемочную, к полету для воздушной киносъемки.

Кинооператор воздушных киносъемок должен хорошо знать все оборудование и арматуру кабины, правила пользования кислородным и высотным снаряжением, внутрисамолетной связью и средствами аварийного покидания самолета. Кинооператор должен быть требовательным к себе в обращении с киноаппаратом и размещении его в кабине самолета. Киноаппарат и запасные кассеты должны быть по возможности закреплены и размещены так, чтобы они не мешали органам управления самолетом, двигателем и другими агрегатами и системами. Нужно предусмотреть место, куда можно определить киносъемочный аппарат в случае аварийного покидания самолета, так как при большой скорости полета выбросить его за борт невозможно.

На больших скоростях и высотах полета кинооператор испытывает большие перегрузки. А так как ручные киноаппараты для 35-*мм* пленки имеют значительный вес, то кинооператор, учитывая действие перегрузок различной величины и направления, должен предусмотреть определенные положения и способы держания киноаппарата при съемке.

Особенно важное значение при работе с ручным киноаппаратом имеет устойчивая двусторонняя связь кинооператора с летчиком.

Для воздушной киносъемки с самолета может быть использован, вообще говоря, любой ручной киносъемочный аппарат. Однако наибольшие удобства создают специальные авиационные киносъемочные аппараты АКС-2 и АКС-4, снабженные коллиматорным визиром, электрообогревательным устройством и имеющие электропривод, рассчитанный на питание от бортовой сети самолета. Киноаппараты АКС-2 и АКС-4 хорошо вписываются в контуры фо-

наря кабины самолета при держании на правом плече кинооператора.

В условиях полета вибрации самолета поглощаются телом кинооператора, если киноаппарат прижат к его плечу и не касается деталей кабины. Однако качка и «рыскание» самолета требуют от кинооператора сноровки, чтобы по возможности компенсировать все колебания и наклоны киноаппарата. При наблюдении снимаемого объекта через коллиматорный визир это достигается сравнительно легко, разумеется, при известной тренировке.

Влияние качки самолета на устойчивость кадра зависит от фокусного расстояния объектива. При широкоугольном объективе устойчивость кадра всегда будет лучше, чем при применении длиннофокусного объектива.

На любом самолете кинооператор имеет ограниченный обзор. С наихудшими в этом отношении условиями приходится встречаться почти на всех тяжелых самолетах, крылья и стабилизаторы которых создают большие непросматриваемые зоны. Лучшие условия обзора предоставляют кинооператору одномоторные двухместные учебно-тренировочные самолеты, так называемые «спарки». В полете такой самолет способен создать для кинооператора очень хороший обзор благодаря своей маневренности. Все зависит от летчика, который пилотирует самолет с кинооператором. Он может в нужный момент сделать крутой вираж, выполнить спираль, скользить на крыло, сделать управляемый переворот с выходом в пикирование. Из всех положений перечисленных фигур пилотажа можно производить киносъемку ручным киноаппаратом, причем при умелом пилотировании самолета летчиком кинооператору, находящемуся в задней или передней кабине, предоставляется почти неограниченный обзор.

Преимущества маневренного самолета могут быть использованы при киносъемке только ручным киноаппаратом, не связанным каким-либо креплением с самолетом, пусть даже легко подвижным. При выполнении самолетом пилотажных фигур кинооператор должен делать не только горизонтальное или вертикальное панорамирование, но также наклоны в стороны для выравнивания кадра по горизонту в зависимости от положения самолета.

Киносъемку с маневренного самолета можно успешно выполнить, только пользуясь визиром коллиматорного типа.

Важной особенностью воздушной киносъемки является быстрота и неповторимость положений объектов съемки и ситуаций в воздухе. Поэтому кинооператор должен обладать очень важным качеством: успевать производить съемку вовремя, без подготовки и всегда правильно. Он должен предвидеть развитие ситуации в воздухе и начинать съемку не в процессе развития действия, но когда оно только начинается, когда к нему есть повод. Он должен внимательно следить за обстановкой, ни на один момент не выпускать из своего внимания объекты съемки, держать связь с летчиком, сообщать ему обо всем замеченном и о своих намерениях и действиях.

Большое значение имеет согласованность действий кинооператора и летчиков как операторского самолета, так и снимаемых самолетов, которые должны в нужный момент занять правильное исходное положение, выдерживая при этом заданную скорость, а в ходе съемки точно выполнять все необходимые эволюции самолетов.

Чтобы кинооператор мог произвести киносъемку, летчик операторского самолета должен пилотировать самолет только с положительной перегрузкой.

Киносъемки самолетов в горизонтальном полете отличаются малой динамичностью, когда они производятся с параллельно летящего самолета, несмотря на большую скорость полета. Для того чтобы обнаружить движение самолета, летящего рядом на параллельном курсе, надо совершать полет вблизи облаков, находясь как можно ближе к ним. Весьма эффектные кадры получаются, когда самолет летит над верхней кромкой облачности, временами врезаясь в отдельные выступающие части облаков, или когда самолет летит низко над землей (бреющий полет) и проецируется на фоне земли.

Когда снимаемый самолет и самолет с кинооператором летят рядом с одинаковой скоростью, то движение не ощущается совершенно, если небо чистое или облака находятся в отдалении. Еще хуже, когда операторский самолет обгоняет самолет снимаемый. При этом получается парадоксальная картина, что будто бы самолет — объект съемки — не летит вперед, а пятится назад. Поэтому, планируя киносъемку с самолета в горизонтальном полете, всегда следует предусматривать соотношение скоростей полета снимаемого и операторского самолетов. Тот самолет, который является объектом съемки, должен лететь с большей скоростью, чем операторский самолет, чтобы исключить появление иллюзии обратного движения.

Киносъемка с самолетов автоматическими киноаппаратами. Многие выразительные динамичные и впечатляющие кинокадры могут быть сняты с одноместных самолетов или с таких точек на самолете, которые недоступны для кинооператора с ручным киносъемочным аппаратом. Такие воздушные киносъемки производятся автоматическими киноаппаратами, установленными неподвижно либо в кабине самолета или всевозможных отсеках, либо на внешних подвесках в специальных обтекаемых контейнерах. Управление киноаппаратами осуществляется дистанционно или по заданной программе с помощью командного прибора. «Пристрелка», то есть совмещение оптических осей киноаппарата и самолетного прицела, производится на земле, в воздухе же наведение киноаппарата на объект съемки осуществляется самолетом.

Внутри самолета киноаппарат защищен от воздействия встречного потока воздуха, а в герметизированной кабине работает в условиях нормальной температуры.

Примерные места на самолете, где возможна установка кино-

съемочных аппаратов в подвесных обтекаемых контейнерах, показаны на рис. 17-3.

Киноаппараты для 16-*мм* кинопленки значительно легче установить на самолет благодаря меньшим их габаритам.

Бывают случаи, когда на самолет устанавливают несколько киноаппаратов. В качестве примера можно привести съемку процесса катапультирования кресла летчика с манекеном пятью 16-*мм* киноаппаратами. Четыре киноаппарата установлены на концах

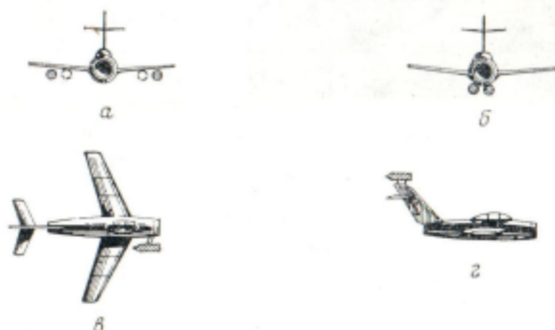


Рис. 17-3. Примерные места установки киноаппаратов на самолете в наружных подвесных обтекаемых контейнерах:

а — под плоскостью; *б* — под фюзеляжем; *в* — в носовой части; *г* — над килем

консолей крыла самолета: два из них направлены в сторону кабины и снимают выход катапультного кресла с манекеном, а два других направлены на киль и стабилизатор — для фиксирования пролета кресла с манекеном через киль самолета. Пятый киноаппарат установлен в кабине летчика и направлен объективом назад по полету — для регистрации отклонения катапультного кресла с манекеном при перелете через киль. Включение всех пяти киноаппаратов производилось одновременно в момент включения в действие катапультного устройства.

Операторские самолеты. У воздушного кинооператора нередко возникает мысль о создании операторского самолета, специально оборудованного для киносъемки, который обеспечивал бы наилучшие возможности для работы и решения изобразительных задач. Эту идею автору данной работы удалось реализовать дважды.

Первый операторский самолет был оборудован еще в годы Великой Отечественной войны. Наиболее подходящим по тем временам был учебно-тренировочный истребитель «спарка», то есть двухместный самолет с двойным управлением. Задняя кабина этого самолета, обычно предназначаемая для летчика-инструктора, была переоборудована под рабочее место кинооператора. Второе управление и сиденье летчика второй кабины были демонтированы и



Рис. 17-4. Антивибрационная установка (стабилизатор Тайлера)

установлено поворачивающееся сиденье для кинооператора, которое обеспечивало ему наиболее удобное положение во время съемки. В кабине были установлены футляры для кассет с кинопленкой и розетка для подключения ручного киноаппарата, а также щиток с тумблерами для включения трех автоматических киноаппаратов.

Подвешенные под крыльями самолета два киноаппарата могли снимать вперед по полету или с небольшим наклоном вниз. Третий киноаппарат был помещен в фюзеляже и направлен объективом вниз для плановой съемки.

На приборной доске в операторской кабине имелись следующие приборы: указатель скорости, высотометр, компас, указатель скольжения и указатель набора высоты.

Самолет был оборудован переговорным устройством для связи с летчиком и приемно-передающей радиостанцией, пользоваться которой могли как летчик, так и кинооператор. На самолете также имелось кислородное оборудование.

Диапазон скоростей операторского самолета с поршневым двигателем Як-7 был в пределах 250—550 *км/ч*, что вполне соответствовало требованиям того времени. Этот операторский самолет использовался очень часто для съемок пилотажа при создании учебно-инструктивных фильмов, а также для документальных и научных киносъемок.

Киносъемка с вертолетов. Вертолеты используются кино- и телеоператорами главным образом в качестве своеобразного операторского крана для хроникальных и документальных киносъемок или показа всевозможных событий, происходящих на земле. При съемке художественных кинофильмов также используют вертолет, чтобы показать какое-либо действие с верхней точки.

Киносъемки с вертолета производятся с небольшой высоты (порядка 20—100 *м*). Часто бывает необходимо, чтобы вертолет «зависал» над определенным местом. Такой режим полета вертолета характеризуется сильными вибрациями, что создает трудные условия работы кинооператору. Получить хорошее стояние кадра при работе ручной кинокамерой, особенно если объектив не широкоугольный, бывает невозможно. Поэтому кинокамеру крепят на опоре с демпфирующей системой.

Имеется ряд способов, которые позволяют снизить воздействие вибраций на кинокамеру. Простейший из них — это подвеска си-

денья кинооператора и опоры для кинокамеры в вертолете на резиновых амортизаторах. Кроме того, к панорамной головке, на которой устанавливается кинокамера, крепятся подвесы с грузилами, назначение которых состоит в том, чтобы создать условия, при которых резонансная частота вибраций кинокамеры не совпадает с вибрациями вертолета. Путем соответствующего расположения грузил по трем осям и подбора их веса удается значительно снизить воздействие вибраций вертолета на кинокамеру и получить хорошую устойчивость кадра.

Другой способ демпфирования вибраций вертолета заключается в применении масляных или пневматических амортизаторов, вмонтированных в устройство, на котором крепится кинокамера. На рис. 17-4 показано одно из таких устройств. Это так называемый стабилизатор Тайлера, сконструированный воздушным кинооператором, много снимавшим с вертолетов. Здесь органы управления кинокамерой: наводка на фокус, изменение фокусного расстояния вариообъектива, установка диафрагмы, включение и выключение электродвигателя, а также кнопка включения переговорного устройства расположены на рукоятках панорамной головки.

Многократно делались попытки использовать гироскопические устройства для демпфирования вибраций и стабилизации кинокамеры. На рис. 17-5 показана кинокамера «Аррифлекс-16» с гиростабилизатором фирмы «Кеньон» (США). Этот прибор состоит из двух гироскопов, подвешенных на пружинах в одном алюминиевом корпусе. Габариты прибора: диаметр 7 *см,* длина 12,5 *см.* Масса прибора — около 600 *г.* Гироскопы делают до 21000 *об/мин.* Разгон гироскопов осуществляется от малогабаритных электродвигателей, питаемых от аккумулятора через преобразователь, вырабатывающий переменный ток 400 *Гц,* 115 *В.* Гиростабилизатор «Кеньон» выполняет свою задачу с некоторыми ограничениями, которые

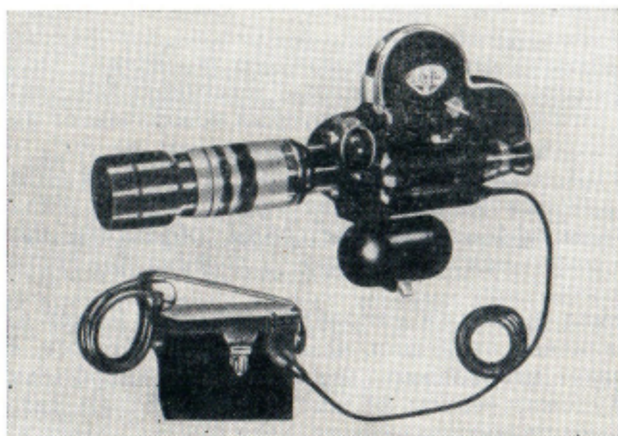


Рис. 17-5. Киноаппарат «Аррифлекс-16» с гиростабилизатором

возникают по двум причинам: во-первых, гироскопам необходимо время для собственной стабилизации после того, как кинокамера установлена в положение для съемки; во-вторых, при панорамировании и наклонах кинокамеры стабилизация гироскопов нарушается. При каждом резком движении кинокамеры требуется некоторое время, чтобы гироскопы стабилизировались и были подготовлены для выполнения своего назначения.

Наиболее эффективна гироуправляемая оптическая система, получившая название «Диналенз», которая устанавливается перед объективом кинокамеры и компенсирует дрожание изображения в кадре оптическим путем.

Две плоские стеклянные пластины соединены гибким рукавом, заполненным прозрачной жидкостью. Показатели преломления стеклянных пластин и жидкости одинаковы, так что система представляет собой как бы один оптический элемент. Когда обе стеклянные пластины расположены абсолютно параллельно, то лучи света, проходящие через пластины и жидкость, не получают отклонения (рис. 17-6, *а*). При наклоне же пластин образуется призма, и проходящие через нее световые лучи отклоняются. Величина отклонения лучей определяется углом призмы и показателем преломления среды. Это дает возможность компенсировать наклоны кинокамеры и сохранять образуемое объективом изображение в стабильном положении (рис. 17-6, *б*).

Обычно такая насадка строится так, чтобы входную стеклянную пластину можно было поворачивать вокруг горизонтальной оси, а выходную — вокруг вертикальной. Углы наклона пластин изменяются с помощью сервоэлектродвигателей, а точное управление движением пластин осуществляется гироскопами. Упрощенная блок-схема корректирующей системы изображена на рис. 17-7. Таких систем имеется две: одна служит для управления горизонтальными, а другая — вертикальными наклонами стеклянных пластин. Гироскоп, приводимый в движение электрическим током с частотой 800 *Гц*, стабилизирует систему. Колебания кинокамеры и объектива относительно стабилизированного положения гироскопа вызывает появление сигналов, которые детектируются, усиливаются и управляют электродвигателем, который поворачивает пластину.

Система «Диналенз» погашает более чем на 80% вибрации в области от 0,3 до 30 *Гц*, компенсируя отклонения оптической оси объектива кинокамеры вследствие вибраций в пределах $\pm 4°$.

Уменьшение эффективной светосилы объектива при съемке с приставкой равно приблизительно $^1/_2$ деления диафрагмы.

Киносьемка пилотажа самолетов. Самолет может выполнять в воздухе различные эволюции, называемые пилотажем. Фигуры пилотажа бывает необходимо показывать в кинофильмах любого жанра. В художественном фильме это может быть связано с драматургическим развитием сюжета, хотя многие воздушные эпизоды снимаются для таких фильмов методами комбинированных съемок. В документальных и особенно в учебных фильмах требуется показ

подлинных событий и действий. Так, например, в документальном кинофильме о соревнованиях спортсменов-летчиков нужно показать подлинные пилотажные фигуры, а в учебном фильме для летчиков этот показ должен быть настолько точный, чтобы научить зрителей, изучающих летное дело, как правильно выполнять различные эволюции в воздухе.

Киносъемка пилотажных фигур представляет сложную задачу для кинооператора и каждую из них бывает невозможно показать

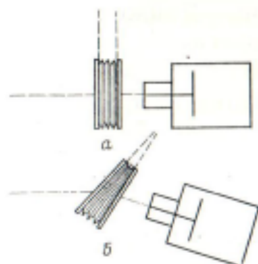


Рис. 17-6. Принцип действия гиростабилизированной оптической насадки «Диналенз»

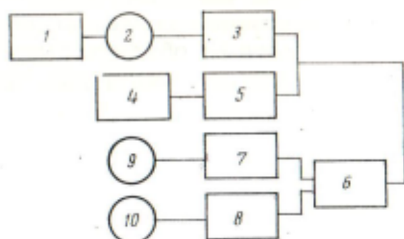


Рис. 17-7. Блок-схема гиростабилизированной оптической насадки «Диналенз»:

1 — генератор тока 800 *Гц*; *2* — гироскоп; *3* — демодулятор; *4* — генератор; *5* и *6* — усилители; *7* и *8* — управление первым и вторым серводвигателями; *9* и *10* — серводвигатели

выразительно приемом непрерывной съемки. В большинстве случаев необходима монтажная съемка.

Начнем с примера съемки взлетающего самолета. Взлет самолета включает четыре стадии: разбег, отрыв от земли, выдерживание и набор высоты. В зависимости от типа самолета для взлета требуется дорожка длиной от нескольких сотен метров до нескольких километров. Поэтому киносъемка взлетающего самолета непрерывным панорамированием всегда дает искаженную картину. Искажение тем сильнее, чем короче фокусное расстояние объектива.

Когда для учебного фильма нужно показать взлет самолета, то это лучше сделать приемом монтажной съемки. Начало движения самолета со стартовой линии и разбег обычно показывают, снимая с земли. Продолжение разбега — съемкой автоматической кинокамерой, установленной под фюзеляжем самолета. Затем следует вид из кабины вперед с точки зрения летчика. Стадию выдерживания для набора скорости можно снять с параллельно взлетающего самолета.

Переход на набор высоты можно снять опять с земли, но при движении самолета на аппарат.

Правильный по темпу монтаж пяти съемочных планов создаст более реальное представление (и ощущение) процесса взлета, чем

съемка от начала до конца одним планом с панорамированием с одной точки.

Съемку посадки самолета также следует расчленить на ряд монтажных кадров.

Если снимать горизонтально летящий самолет с другого параллельно летящего самолета, то, несмотря на живописность воздушного пейзажа с кучевыми облаками, кинокадр будет не динамичным, мало отличающимся от статической фотографии. В кадре не будет движения, несмотря на то, что скорости самолетов как снимаемого, так и операторского очень большие. Движение будет наблюдаться только тогда, когда самолет пролетает в непосредственной близости от облаков и снимаемый самолет обгоняет операторский самолет.

Часто применяемая съемка самолета в профиль производится с параллельно летящего самолета кинооператором, вооруженным ручной кинокамерой. Съемка самолетов, летящих впереди, выполняется либо ручной кинокамерой из передней кабины тяжелого самолета, либо автоматической кинокамерой, подвешенной под крылом самолета или установленной в передней его части.

Наиболее простая пилотажная фигура — вираж,— выполняемая при всех разворотах самолета. Виражом называют движение самолета по кривой с креном на крыло в сторону разворота. Если снимать самолет, выполняющий вираж, с параллельно летящего самолета, то на экране мы увидим, как он показывает зрителю свою нижнюю часть и постепенно удаляется, уменьшаясь в размерах. Поворота самолета мы не увидим. Эта обманчивая картина еще больше усугубится, если операторский самолет разворачивается в ту же сторону, куда направился снимаемый самолет.

Вираж очень хорошо получается на экране, когда он снимается с земли или вышки, а самолет выполняет вираж на небольшой высоте. На большой высоте можно применить автоматическую съемку кинокамерой, установленной вперед по полету на самолете, идущем сзади снимаемого самолета.

Часто применяемая в тренировочных полетах пилотажная фигура — «бочка». Самолет при горизонтальном полете делает поворот на 360° вокруг продольной оси. Различают два вида двойного переворота: скоростной и авторотационный. Скоростной управляемый двойной переворот выполняется с незначительным отклонением от линии горизонтального полета. Другой вид двойного переворота начинается с поднятия носа самолета, сваливания на крыло с потерей высоты. Затем самолет переворачивается и снова переходит в горизонтальный полет. Двойной переворот первого вида можно снимать со сравнительно близкого расстояния с другого самолета, летящего параллельно. При съемке же двойного переворота второго вида требуется значительное удаление от снимаемого самолета, так как авторотационное вращение самолета происходит в пределах большого радиуса. Двойные перевороты самолетов хорошо можно снять автоматической кинокамерой с самолета, следующего сзади за снимаемым самолетом.

На авиационных соревнованиях летчики-спортсмены часто выполняют серии «восходящих бочек» во время полета с набором высоты после разгона до максимальной скорости. Такие фигуры лучше снимать телеобъективом с земли.

Кроме описанных выше пилотажных фигур, самолеты выполняют планирование при снижении, скольжение на крыло для уточнения направления при посадке и парашютирование с плавной потерей высоты. Разумеется, что творческий подход к созданию кинофильмов на авиационные темы может дать много новых интересных решений изобразительных задач. Здесь намечены общие вехи для кинематографического отображения эволюций самолетов в воздухе.

Киносъемка парашютистов в свободном падении. Большую трудность до недавнего времени представляла киносъемка прыжков парашютистов с задержкой раскрытия парашюта.

Совершая свободное падение, парашютист выполняет ряд сложных фигур, искусно управляя своим телом. Падая в воздухе с нераскрытым парашютом, человек достигает максимальной скорости через 12—14 *с*. В зависимости от положения его тела эта скорость колеблется в пределах от 45 до 75 *м/с*.

Для съемки парашютиста в свободном падении кинооператор должен совершать такое же свободное падение, как и объект съемки. Если парашютист умеет сохранять стабильное положение тела при падении, колебания скорости уменьшаются и падение происходит более или менее равномерно. Именно это и позволяет парашютисту управлять своим телом, падать по своему усмотрению головой вниз или ногами вниз, плашмя или навзничь.

К выполнению прыжков с задержкой раскрытия парашюта допускаются только люди, хорошо освоившие прыжки с ручным способом раскрытия парашюта без задержки раскрытия. Прыжки с задержкой раскрытия парашюта более 20 *с* требуют особо тщательной и всесторонней подготовки.

Кинокамеру стали укреплять на гермошлеме. На кинокамеру надевается колпак-обтекатель. Вся установка вместе со шлемом и обтекателем крепится на голове парашютиста подбородочным ремнем и резиновыми амортизаторами. При этом обязательно должна быть предусмотрена возможность откинуть на спину кинокамеру и удерживать ее на ранце основного парашюта во время приземления.

Малогабаритный серебряно-цинковый аккумулятор обычно крепится на запасном парашюте с помощью резиновых амортизаторов. Вилочные соединения электрошнура заменяются штепсельными герморазъемами. Пусковая кнопка монтируется в перчатке правой руки, и парашютист едва заметным движением пальцев может пускать в ход и выключать электродвигатель кинокамеры.

В качестве видоискателя обычно используют рамки, нарисованные на защитном стекле гермошлема. Здесь же помещают красную сигнальную лампочку, которая загорается в момент включения кинокамеры и указывает на то, что кинокамера работает.

Для съемки парашютистов в свободном падении применяют короткофокусные объективы и сильное диафрагмирование для получения большой глубины резко изображаемого пространства. Этим обусловливается и выбор кинопленки, которая должна обладать высокой светочувствительностью и большой фотографической широтой.

Съемка производится, как правило, с повышенной частотой, чтобы улучшить устойчивость кадра и придать движениям парашютистов в воздухе плавность. Для некоторых съемок, например исследовательских, может потребоваться скоростная киносъемка.

Парашютист-кинооператор и парашютисты, которых необходимо заснять в свободном падении, могут покидать один и тот же самолет или прыгать с двух самолетов, летящих параллельно.

После отделения от самолета скорость падения парашютиста нарастает в течение 12—14 *с*, после чего стабилизируется. За это время теряется 390—440 *м* высоты. Так как парашют нужно раскрыть на высоте около 600 *м* от земли, то, чтобы иметь возможность находиться в свободном падении 60 *с*, необходимо покинуть самолет на высоте 3500—4000 *м*.

Кинокадры свободного падения парашютистов помимо того, что они очень эффектны, могут представлять большую научную ценность.

Глава 18

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ КИНОСЪЕМКА

Кинофильм содержит в себе информацию о движении снятых объектов, которая может быть использована не только для качественного, но и для количественного анализа этого движения. В ряде ситуаций киносъемка оказывается единственно возможным способом регистрации динамических характеристик изучаемых процессов.

Таким образом, киносъемочный аппарат становится измерительным инструментом, а кинопленка — накопителем информации о движении или изменении снимаемых объектов.

Поскольку в отдельных кадрах кинофильма зафиксированы последующие положения движущегося объекта, то можно восстановить траекторию его движения и произвести измерения отрезков пути s, пройденного движущимся объектом за известный промежуток времени t. На основе этих данных можно определить скорость движения v объекта на любом участке траектории по формуле:

$$v = \frac{ds}{dt} \text{ м/с}, \qquad (18\text{-}1)$$

а затем вычислить ускорение w:

$$w = \frac{dv}{dt} \text{ см/с}^2. \qquad (18\text{-}2)$$

Зная массу объекта m и скорость его движения t, можно вычислить кинетическую энергию k':

$$k' = \frac{mv^2}{2} \text{ м}\cdot\text{кг}. \qquad (18\text{-}3)$$

Далее по известным формулам можно вычислить величину силы, работы, мощности и другие данные.

Получение количественных данных путем анализа кадров кинофильма должно быть предусмотрено уже при съемке.

Во-первых, одновременно со съемкой необходимо регистрировать отметки времени, если частота киносъемки не выдерживается достаточно точно.

Во-вторых, в охватываемом кинокадром пространстве нужно иметь неподвижную опорную точку, которая при дальнейшем анализе кинокадров дала бы возможность исключить влияние неустойчивости кадра. Эта же точка может служить также началом отсчета координат движущегося предмета.

В-третьих, необходимо зафиксировать в кадре линейный масштаб снимаемого предмета. Для определения масштаба изображения может быть использована рейка с делениями, помещенная по возможности в плоскости движения объекта. Масштабную рейку может заменить любой отрезок, отмеченный контрольными метками, лишь бы расстояние между ними было точно измерено.

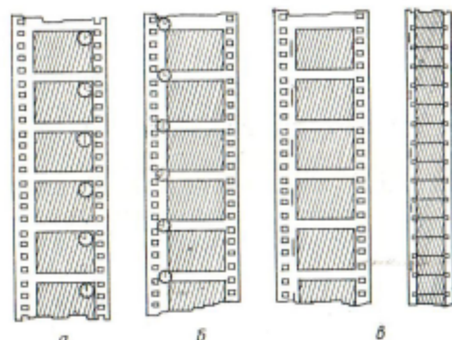


Рис. 18-1. Способы регистрации времени на кинофильме

Для выполнения измерений с высокой точностью большое значение имеет разрешающая способность съемочной оптики и кинопленки, а также информационная емкость кинокадра. В ряде случаев преимущество имеет крупный формат кинокадра.

Регистрация времени на кинопленке является важнейшим элементом измерительной киносъемки, так как при отсутствии шкалы времени невозможно определение скорости движения снимаемых объектов.

Особого устройства для регистрации времени на кинопленке не требуется, если киносъемочный аппарат с прерывистым движением кинопленки имеет привод от электродвигателя, дающего точно определенное число оборотов, регулируемого с помощью электронного устройства. Для синхронных электродвигателей, питаемых от сети переменного тока, нестабильность числа оборотов лежит в пределах $\pm 2\%$. Киносъемочные аппараты с пружинным приводом и центробежным регулятором скорости вращения дают отклонения частоты съемки не более $\pm 1{,}5$—2%. При цейтраферных киносъемках время отсчитывается интервалометром с вполне достаточной точностью. Во всех других случаях, а в особенности при работе с высокоскоростными киноаппаратами, скорость которых всегда непостоянна, необходимы отметчики времени на кинопленке.

Регистрация времени на той же кинопленке, на которую производится съемка изучаемого процесса, возможна разными способами. Простейший способ — это включение в кадр циферблата хронометра (рис. 18-1, *а*). В некоторых киноаппаратах, как, например, АКС-2, РФК-5 и др., часы вмонтированы в корпус аппарата и циферблат часов с помощью внутренней оптической системы фотографируется на кинопленке, как показано на рис. 18-1, *б*. В высоко-

скоростных киноаппаратах с непрерывным движением кинопленки временные отметки наносятся по краю кинопленки в виде полосок (рис. 18-1, *в*). Эти отметки получаются от вспышек газосветной лампочки, получающей импульсы напряжения от сети переменного тока или специального генератора, вырабатывающего электрические импульсы строго определенной частоты, например 1000 *Гц*. Измеренное расстояние от начала одной метки до начала следующей метки дает возможность определить скорость движения кинопленки. Зная шаг кадра, вычисляют частоту киносъемки по формуле:

$$n = \frac{v}{h} \text{ кадр/с}, \tag{18-4}$$

где n — частота киносъемки, *кадр/с;* v — скорость движения кинопленки; h — шаг кадра.

Одновременная регистрация других параметров. Изучение некоторых процессов с помощью киносъемки требует в ряде случаев одновременной регистрации других физических параметров (давления, температуры, электрического напряжения, свечения и др.), которые могут быть представлены в виде осциллограммы на экране электронно-лучевой трубки.

Регистрация осциллограммы на той же кинопленке, на которую производится киносъемка изучаемого объекта, осуществляется с помощью второго объектива и призмы, встроенных в киноаппарат. На рис. 18-2 приведена схема такого устройства в высокоскоростном киноаппарате с непрерывным движением кинопленки. Здесь осциллограмма накладывается на изображение кадра. Аналогичная оптическая система может быть встроена и в киноаппарат с прерывистым движением кинопленки, но в том месте, где кинопленка подается непрерывно, например, на транспортирующем зубчатом барабане.

Чтобы совместить в одном кинокадре два изображения, одно рядом с другим, применяют двухобъективную систему, показанную на рис. 18-3. Деление кадра осуществляется с помощью каше, устанавливаемых позади каждого из двух объективов. Оба объектива образуют свои изображения в одной общей плоскости. Эти изображения переносятся на кинопленку репродукционным объективом, расположенным в тубусе. Такая двухобъек-

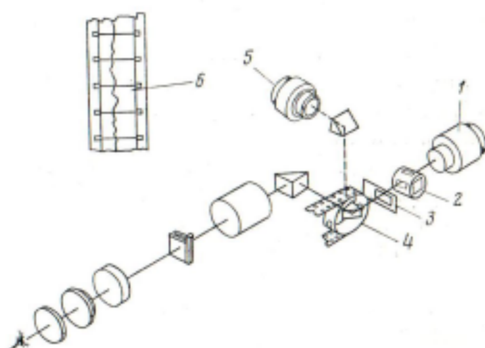


Рис. 18-2. Оптическая система устройства для регистрации осциллограммы на кинопленке:
1 — съемочный объектив; *2* — компенсирующая вращающаяся призма; *3* — кадровое окно; *4* — ведущий зубчатый барабан; *5* — объектив, образующий изображение экрана электронно-лучевой трубки; *6* — изображение осциллограммы в кинокадре

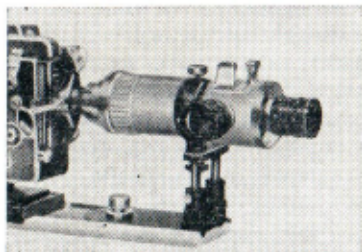


Рис. 18-3. Двухобъективная оптическая система для одновременной киносъемки двух объектов

тивная система пригодна для любых киноаппаратов, как с прерывистым, так и с непрерывным движением кинопленки.

Требования к съемочной оптике, аппаратуре и пленке. Для получения высокой точности при последующем анализе кинофильма необходимо, чтобы изображения снятых объектов были максимально резкими и не имели искажений, зависящих от съемочной оптики, киноаппарата и кинопленки, а также возникающих в самом процессе съемки.

Требования к съемочной оптике.

Для измерительной киносъемки следует использовать только такие объективы, которые обладают высокой разрешающей силой и минимальной дисторсией. Недопустимо сильное диафрагмирование объектива, которое сопровождается уменьшением разрешающей силы.

Целесообразно испытать объективы, чтобы получить следующие характеристики: 1) точная величина фокусного расстояния при разных значениях диафрагмы; 2) разрешающая сила в центре и по полю кадра при разных значениях диафрагмы; 3) величина дисторсии; 4) распределение освещенности по полю кадра; 5) эффективная светосила; 6) светорассеяние линзами объектива, влияющее на контраст изображения.

Требования к киносъемочному аппарату.

1. Высокая точность стояния кадра. Наиболее удовлетворяют этому требованию киносъемочные аппараты типа ПСК, обеспечивающие точность стояния кадра 0,007—0,008 *мм*.

Высокоскоростные киноаппараты с непрерывным движением кинопленки не могут дать высокой точности стояния кадра. Однако в ряде случаев их приходится использовать и для измерительных киносъемок.

2. Возможность уменьшения выдержки с помощью обтюратора с переменным раскрытием, чтобы смазка изображения движущихся объектов не превышала расчетной величины.

3. Полное соответствие положений плоскостей кинопленки и матового стекла видоискателя по отношению к объективу.

4. Наличие перекрестия на матовом стекле видоискателя, совпадающего с точкой пересечения главной оптической оси объектива с матовым стеклом. Эта точка должна также совпадать с центром кадрового окна и точкой пересечения главной оптической оси объектива с плоскостью кинопленки.

5. Киносъемочный аппарат должен иметь отметчик времени, регистрирующий скорость движения кинопленки или частоту съемки. Отметчик времени совершенно необходим во всех скоростных

и высокоскоростных киноаппаратах. Лишь когда привод киноаппарата (не скоростного) осуществляется от синхронного электродвигателя или от электродвигателя со стабилизированной скоростью вращения, отметчик времени не обязателен.

6. Штатив киноаппарата должен быть устойчивым, не допускающим вибраций при работе киноаппарата или малейших отклонений его главной оптической оси от установленного положения.

Требования к кинопленке.

Кинопленка должна быть особомелкозернистой с большой разрешающей способностью.

Большое значение имеют точные геометрические размеры кинопленки и перфораций. Так как при химико-фотографической обработке и последующем высушивании, а также при хранении основа кинопленки изменяет свои размеры, то для точных измерительных киносъемок используют кинопленку на безусадочной полистироловой основе.

Способы измерительной киносъемки. Каждый новый объект исследования, как правило, выдвигает новые задачи, которые могут быть решены различными способами.

Основываясь на опыте применения киносъемки в измерительных целях, мы наметим пока лишь условно четыре способа измерительной киносъемки: однокамерный, многокамерный, стереоскопический и кинотеодолитный.

Однокамерный способ. Если движение изучаемого объекта происходит в одной плоскости, которая параллельна плоскости кинопленки в кадровом окне киноаппарата, то по материалам киносъемки, полученным с одной съемочной точки, можно определить многие количественные данные. Рассмотрим несколько примеров такой измерительной киносъемки.

На первом примере (рис. 18-4) показан результат анализа движений спортсмена, выполняющего прыжок с шестом через рейку.

По изображениям кинокадров воспроизведены положения спортсмена через равные промежутки времени и получена траектория его движения. Масштабной рейкой в данном случае является шест, на котором нанесены деления.

Зная масштаб изображения, измеряют отрезки пути, проходимые спортсменом за известные интервалы времени. По этим данным определяют скорость движения спортсмена и ускорения на любых

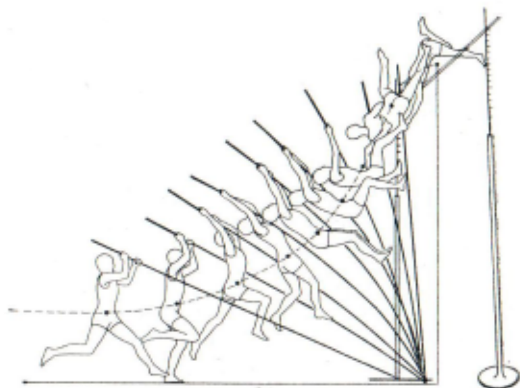


Рис. 18-4. Анализ движений спортсмена по материалам киносъемки

участках траектории его движения, а также вычисляют другие параметры прыжка (мускульная сила, кинетическая энергия, работа).

Другой пример измерительной киносъемки, выполненной одним киноаппаратом, изображен на рис. 18-5. Здесь киносъемка применена для изучения прыжка парашютиста при малой высоте полета самолета.

Киносъемочный аппарат был установлен на определенном расстоянии от наземного ориентира, над которым должен пролететь самолет, а парашютист — отделиться от самолета. Главная оптичес-

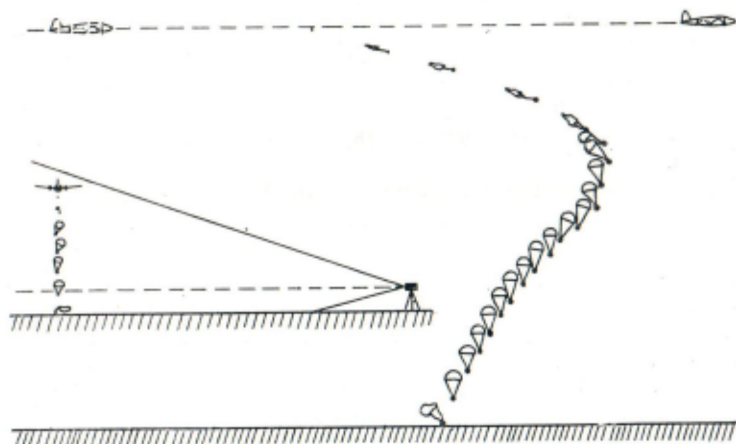


Рис. 18-5. Траектория парашютиста, полученная по материалам киносъемки

кая ось объектива киноаппарата была направлена перпендикулярно курсу полета самолета. Масштаб изображения определялся по известной длине самолета и фокусному расстоянию объектива киноаппарата.

Покадровый анализ кинофильма дал возможность восстановить траекторию, по которой происходил спуск парашютиста, и измерить отрезки пути, проходимые парашютистом за известные промежутки времени.

По траектории снижения парашютиста установлена величина потери высоты до полного раскрытия парашюта и начала спуска с раскрытым парашютом. Определено время раскрытия парашюта и скорость движения парашютиста на разных участках траектории и при приземлении.

Третий пример (рис. 18-6) показывает, что данный способ измерительной киносъемки может быть применен также и в случае, когда изучаемый объект и киносъемочный аппарат движутся с одинаковой скоростью в одном и том же направлении.

В данном случае измерительная киносъемка применена при испытании катапультного устройства для покидания самолета летчиком при большой скорости полета. Определение масштаба изоб-

ражения, как и в предыдущем случае, производилось по известной длине самолета и фокусному расстоянию объектива. Разумеется, при определении истинной скорости движения катапультного кресла с летчиком необходимо учесть скорость полета самолетов.

Многокамерный способ измерительной киносъемки заключается в том, что она производится с двух или трех взаимно перпендикулярных направлений двумя или тремя синхронно работающими киноаппаратами (рис. 18-7). Этот способ съемки применяется при

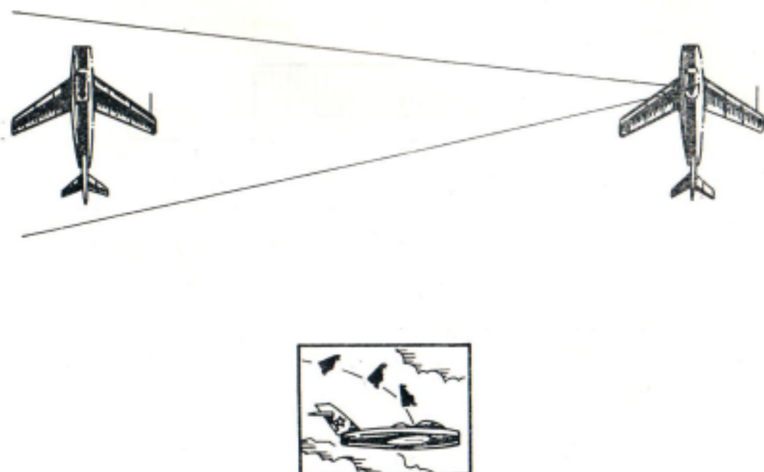


Рис. 18-6. Измерительная киносъемка с движущейся точки

изучении полета птиц и насекомых, при исследованиях моделей самолетов в полете на режиме штопора в вертикальной аэродинамической трубе, а также при исследованиях многих других объектов, движения которых не могут быть упорядочены.

Для упрощения последующего анализа кинокадров позади изучаемого объекта устанавливают щиты с координатной сеткой. Если киноаппараты имеют хорошее стояние кадра, то координатную сетку можно снять предварительно на ту же кинопленку, на которую затем будет производиться съемка объекта.

Одновременно киносъемка с разных направлений может производиться также и одним киноаппаратом с применением системы зеркал. На рис. 18-8 изображена схема установки для изучения полета двукрылых насекомых (пчел, шмелей, мух, комаров, саранчи и т. п.). Исследования проводят в миниатюрной аэродинамической трубе, в рабочей части которой создаются условия, благоприятные для полета исследуемых объектов (освещенность, температура, влажность). Через 15—30 *мин* после включения вентилятора и взлета насекомого устанавливается «стационарный» режим полета, во время которого производится киносъемка высокоскоростным киноаппаратом с трех взаимно перпендикулярных направлений.

Три осветительных фонаря: $Л_1$, $Л_2$ и $Л_3$— с импульсными лампами и конденсорами, формирующими параллельные пучки световых лучей, образуют на трех участках полупрозрачного экрана Э силуэтные изображения исследуемого насекомого в трех проекциях (сбоку, снизу и сзади). Лампа $Л_4$ освещает щель, перекрываемую колеблющейся ножкой камертона. Изображение этой щели

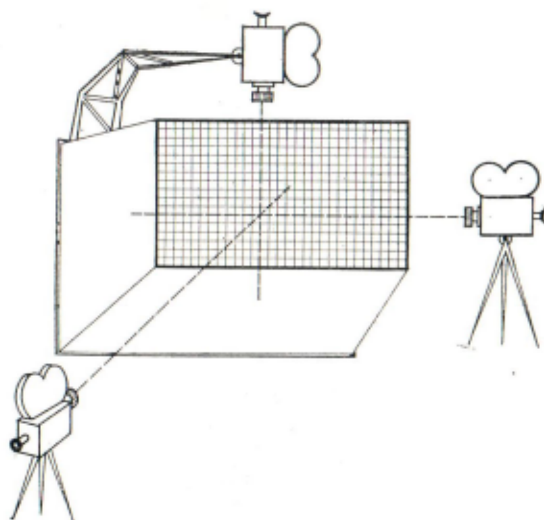


Рис. 18-7. Схема измерительной киносъемки с трех взаимно перпендикулярных направлений

образуется на четвертой части кадра. Перекрытия щели ножкой камертона служат для отметки времени.

Расшифровка материалов киносъемки и восстановление положений корпуса и крыльев насекомого осуществляются путем сравнения силуэтных изображений, полученных на кинопленке, с силуэтными изображениями увеличенной модели насекомого. Измерения производятся с помощью координатника на модели. По материалам киносъемки определяются также временные характеристики взмахов крыла.

Стереоскопический способ. Когда объект съемки движется не параллельно плоскости кинопленки в кадровом окне киноаппарата, а по некоей пространственной траектории, необходима стереоскопическая киносъемка, которая дает возможность восстановить форму траектории и определить скорости движения объекта в пространстве.

Стереоскопическая киносъемка, то есть одновременная съемка одного и того же объекта с двух точек (двумя одинаковыми объективами), по сравнению с обычной киносъемкой одним киноаппаратом является процессом более сложным. При стереоскопической

киносъемке необходимо скомпоновать кадр в трех измерениях, и не всегда точка съемки, приемлемая для обычного кадра, может совпадать с точками съемки стереоскопической пары кадров.

Оптические оси объективов должны быть параллельны между собой и перпендикулярны линии базиса съемки. Величина съемочного базиса является исходной величиной при последующих вычислениях координат объекта, а поэтому должна быть замерена точно при съемке. Обязательным условием измерительной стереоскопической киносъемки является наличие на кинокадрах главной точки картины — точки пересечения оптической оси объектива киноаппарата (главного луча перспективы) с плоскостью кадра. От степени точности, с которой определено положение главной точки картины каждого кадра, зависит непосредственно и точность производимого затем количественного анализа графическим способом.

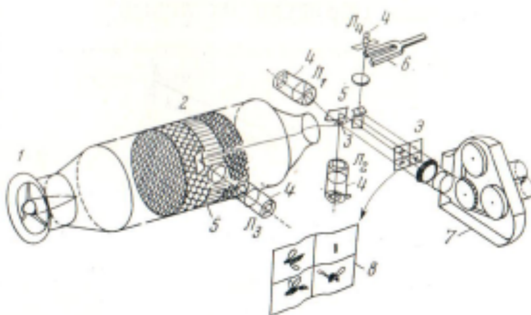


Рис. 18-8. Схема установки для изучения полета насекомых с помощью киносъемки:

1 — вентилятор; *2* — решетки, выравнивающие воздушный поток; *3* — объект съемки; *4* — осветители, образующие параллельный пучок света; *5* — отклоняющие зеркала; *6* — камертонный отметчик времени; *7* — высокоскоростной киноаппарат; *8* — расположение четырех изображений в одном кинокадре

Измерительная съемка стереокиноаппаратом, например 70СКД, имеющим максимальный базис съемки 110 *мм*, возможна при небольших расстояниях до объекта. Чем больше расстояние до объекта, тем больше должен быть базис съемки, чтобы получить в изображениях стереопары такие параллаксы, которые можно измерить с достаточной точностью. Для съемки удаленных объектов может потребоваться базис, равный нескольким метрам (рис. 18-9).

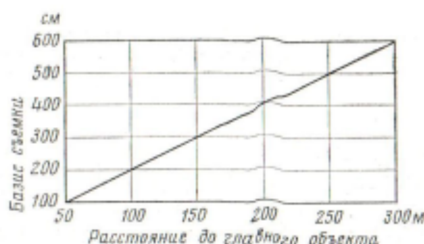


Рис. 18-9. График для определения величины базиса при стереосъемке удаленных объектов

При базисе съемки менее 1 *м* можно применять киноаппарат со специальными большими стереоприставками. Если же съемочный базис больше 1 *м*, измерительная стереокиносъемка производится двумя киноаппаратами, связанными одним общим валом или приводимыми в движение синфазными электродвигателями. Установка киноаппаратов и их взаимное ориентирование производится с помощью геодезических инструментов.

Метрическое дешифрирование материалов измерительной стереоскопической киносъемки производится геометрическим или графическим способом.

Схема геометрического определения координат положения точки в пространстве с помощью стереоскопической съемки изображена рис. 18-10. Здесь N — точка, пространственное положение которой нужно определить; B_c — базис съемки; O_a и $O_в$ — центры объективов, образующих левый и правый кадры стереопары.

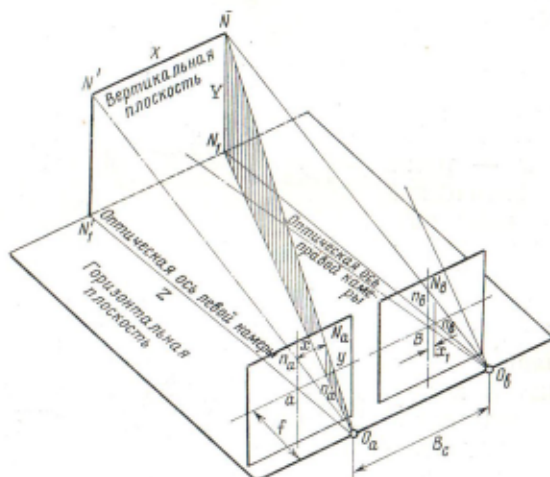


Рис. 18-10. Схема геометрического определения положения точки в пространстве по изображениям стереопары кадров

Точку пересечения главной оптической оси объектива O_a с перпендикулярной ей вертикальной плоскостью, в которой лежит искомая точка N, примем за начало координат (X, Y, Z). Тогда линия N'_1O_a (совпадающая с главной оптической осью левого объектива) будет являться направлением по оси Z. Вертикаль, проходящая через точку N (линия NN_1), будет направлением оси Y, а горизонталь, параллельная съемочному базису B_c, — станет направлением оси X.

Из подобия треугольников $O_aN_1O_в$ и $n_вO_вm$ можно определить отстояние точки N, определяемое как расстояние от центра проекции левого объектива O_a до вертикальной плоскости, проходящей параллельно линии базиса через точку N:

$$Z = \frac{B_c f}{p}, \qquad (18\text{-}5)$$

где f — фокусное расстояние объектива; B_c — базис съемки; $p = x - x_1$ — горизонтальный параллакс точки N на изображениях стереопары. По этой формуле может быть определено отстояние

любой точки снимаемого объекта от вертикальной плоскости, проходящей через съемочный базис.

Из подобия треугольников $N'_1O_aN_1$ и aO_an_a замечаем, что расстояние X от точки N до вертикальной плоскости, проходящей через оптическую ось левого объектива, может быть определено, как

$$X = \frac{Z}{f}\, x, \tag{18-6}$$

где x — горизонтальная координата изображения точки N на левом кадре стереопары. Подставив в полученное выражение (18-6) величину Z, получим:

$$X = \frac{B_c}{p}\, x. \tag{18-7}$$

Эта формула определяет вторую пространственную координату точки N.

Аналогично из подобия треугольников $N'O_aN'_1$ и aO_an_a определяется расстояние Y от точки N до горизонтальной плоскости, проходящей через оптическую ось левого объектива:

$$Y = \frac{Z}{f}\, y, \tag{18-8}$$

где y — вертикальная координата точки N на левом кадре стереопары.

Подставив в это выражение величину Z из формулы (18-6), получим третью пространственную координату точки N, определяющую ее положение по вертикали:

$$Y = \frac{B_c}{p}\, y. \tag{18-9}$$

Таким образом, зная положение базиса съемки, его величину, фокусное расстояние объективов и измеряя параллаксы соответственных точек изображений стереопары, можно определить пространственные координаты снятого объекта. Анализируя последовательные стереопары кадров кинофильма, представляется возможность воспроизвести траекторию движения снятого объекта в пространстве.

Графический способ восстановления положения предмета в пространстве по изображениям стереопары кадров основан на теории перспективы. При этом решается обратная задача перспективы — построение ортогональных проекций предмета по двум перспективам.

Кинотеодолитный способ применяется для определения пространственных координат и восстановления траекторий движения объектов, находящихся на большом удалении и имеющих большую скорость (самолеты, вертолеты и др.).

Кинотеодолитом называют прибор, с помощью которого производится киносъемка объекта и одновременная регистрация в каж-

дом кинокадре направления главной оптической оси объектива по азимуту и углу возвышения. Кадры кинотеодолитной съемки показаны на рис. 18-11.

Два или три кинотеодолита, установленных на определенном расстоянии друг от друга и соединенных электрическими кабелями

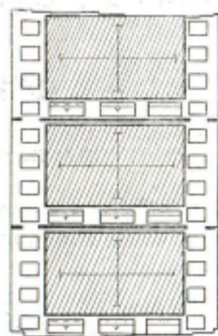


Рис. 18-11. Кадры кинотеодолитной съемки

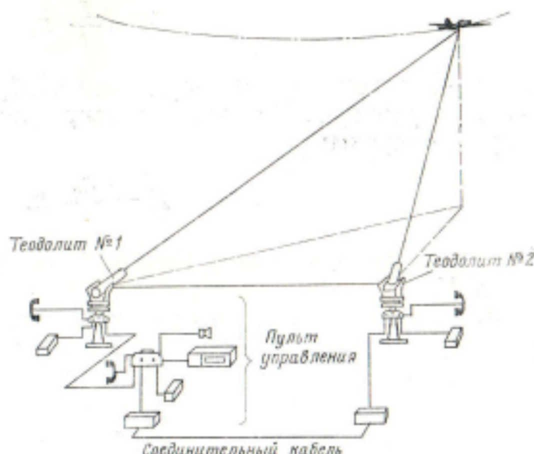


Рис. 18-12. Схема кинотеодолитной съемки

между собой и центральным пунктом управления, составляют кинотеодолитную станцию (рис. 18-12). Нормальное расстояние между кинотеодолитами (базис) обычно равно $^1/_4$—$^1/_5$ среднего расстояния до объекта. Необходимо, чтобы кинотеодолиты были установлены на одном уровне, так как неодинаковое расположение их по высоте значительно усложняет вычисление координат объекта в пространстве.

Для определения пространственных координат объекта достаточно двух кинотеодолитов. Однако в кинотеодолитную станцию,

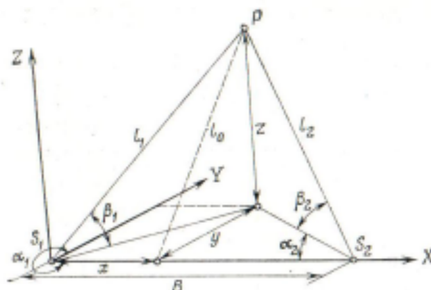


Рис. 18-13. Схема определения координат точки P с помощью кинотеодолитной съемки

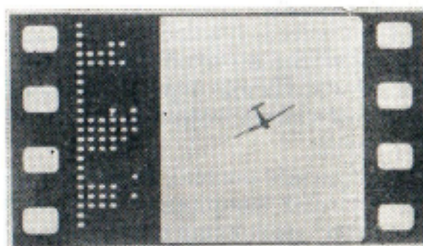


Рис. 18-14. Кадр теодолитной съемки с кодом

как правило, входят три кинотеодолита. Во время работы объект съемки для одного из кинотеодолитов может оказаться против солнца или за облаком. Кроме того, может быть такое положение объекта относительно точек базиса, при котором оси визирования пересекаются под острым углом. В этом случае даже небольшие неточности определения углов могут привести к значительным ошибкам в определении координат объекта.

Во время работы все кинотеодолиты непрерывно наводятся на объект и производится синхронная съемка с двух точек. Если преследуемая цель несколько уйдет с точки пересечения нитей в визире, то это будет зафиксировано на кинопленке и в дальнейшем учтено при анализе материалов съемки.

Вычисление координат и построение траектории движения объекта в пространстве производится на основе следующей схемы (рис. 18-13). Если объект, координаты которого нужно определить, находится в точке P и засечки его произведены кинотеодолитами из точек S_1 и S_2, то пространственные координаты точки P определяются из уравнений:

$$X = \frac{B \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \cos \alpha, \tag{18-10}$$

$$Y = \frac{B \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \sin \alpha, \tag{18-11}$$

$$Z = \frac{B \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \frac{\sin \beta_1}{\cos \beta_2}. \tag{18-12}$$

Имеются кинотеодолиты, в которых регистрация углов азимута и места, а также номеров кадров производится в кодированном виде (рис. 18-14). Дешифрирование такого фильма выполняется на киноанализаторе, связанном со счетно-решающим устройством и перфоратором, который автоматически считывает кодированные данные и поправку допущенной при съемке неточности визирования. Дешифровщик устанавливает легко скользящую сетку экрана киноанализатора на нужную точку изображения и нажимает ногой на педаль, включающую перфоратор, на что затрачивается не более 2 *с*. Перфокарты поступают затем в электронно-вычислительную машину, которая выполняет расчетные операции по определению пространственных координат объекта.

Глава 19

АНАЛИЗИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НАУЧНЫХ КИНОСЪЕМОК

Возможны два способа обработки материалов, полученных в результате научных киносъемок: качественный и количественный.

Качественный анализ может производиться одновременно большим числом наблюдателей; он заключается в том, что материал, полученный в результате киносъемки, просматривают на экране. Качественный анализ дает возможность визуально оценить динамику исследуемого процесса или явления.

Наблюдение несложных движений возможно с помощью обычного кинопроекционного аппарата, работающего с нормальной частотой смен кадров (24 *кадр/с*). Восприятие же и интерпретация движений сложных требует замедленной кинопроекции, полной остановки отдельных кадров и повторных просмотров. Для этого необходим специальный кинопроектор-дешифратор.

Количественный анализ киноматериалов опирается на весь запас информации, содержащейся в каждом кадре. Это относится к случаям, когда кинопленка служит накопителем информации, зафиксированной в результате научной киносъемки, чтобы затем количественно оценить динамику процесса.

Покадровому количественному анализу, как правило, предшествует просмотр киноматериала на экране, во время которого выделяются наиболее важные фазы процесса, подлежащие математической обработке.

Фотограмметрические работы выполняются с помощью разнообразного оборудования. Наиболее простыми приборами, используемыми для построения траекторий движущихся объектов, являются: фотоувеличители, диапроекторы, аппараты для чтения микрофильмов и измерительные микроскопы. Значительно облегчают и ускоряют работу по количественному анализированию кинокадров специальные системы — киноанализаторы с автоматической записью координат точек и вводом данных измерений в электронную вычислительную машину.

Приборы для качественного анализирования кинофильмов. *Просмотровое устройство* для кинофильмов является неотъемлемой принадлежностью современного киномонтажного стола;

оно позволяет просмотреть киноматериал на маленьком экране, чтобы отобрать для монтажа кинофильма нужные куски и затем просмотреть уже смонтированный эпизод.

Устройство (рис. 19-1) состоит из проекционной части, небольшого экрана и моталки с двумя дисками. Благодаря ручному приводу кинопроекция может вестись с любой скоростью, вплоть до полной остановки кадра. Недостаток этого просмотрового устройства заключается в том, что при снижении частоты кинопроекции возникает мерцание экрана.

Кинопроектор-дешифратор — специальный кинопроекционный аппарат; служит созданию наиболее благоприятных условий для качественного анализа материалов научно-исследовательских киносъемок.

Главное требование к кинопроектору-дешифратору заключается в том, что он должен уменьшать скорость кинопроекции вплоть до полной остановки кадра без появления мерцания экрана, мешающего восприятию изучаемого движения.

Как известно, слитное немерцающее изображение на экране возникает лишь тогда, когда частота миганий света будет не менее 48 раз в секунду. Поэтому в кинопроекторах, демонстрирующих кинофильм с нормальной частотой 24 *кадр/с*, используется двухлопастный обтюратор, дважды перекрывающий свет, падающий на экран при проекции каждого кадра. Из этих же соображений в кинопроекторах, работающих с частотой 16 *кадр/с*, применяется трехлопастный обтюратор.

В кинопроекторе-дешифраторе частота обтюрации остается неизменной при всех скоростях проекции кинофильма. Обтюратор вращается с постоянным числом оборотов в секунду, в то время как грейфер входит в перфорации кинопленки и протягивает ее на один кадр не при каждом обороте обтюратора, а через кратное число раз.

Яркость экрана должна оставаться постоянной при любой частоте кинопроекции и остановленном кадре.

Кинопроектор должен иметь прямой и обратный ход, чтобы дать возможность возвращать кинофильм назад для повторных просмотров без перезарядки всего рулона и перемотки его.

Кинопленка в кадровом окне не должна коробиться и повреждаться при длительной проекции остановленного кадра. Это можно обеспечить применением в осветительной системе отражателя с многослойным интерференционным покрытием, пропускающим тепловые лучи и отражающим только видимый «холодный» свет, а также применением теплопоглощающего фильтра на пути света, падающего на кадровое окно проектора.

Необходимо дистанционное управление кинопроектором-дешифратором, так как наблюдатель может находиться не у кинопроектора, а у экрана, чтобы лучше рассмотреть детали изображения.

На рис. 19-2 изображен 16-*мм* кинопроектор-дешифратор «Analyst», который создает необходимые условия для качественного анализа научно-исследовательских кинофильмов.

1. Обычная кинопроекция с частотой 24 *кадр/с*.

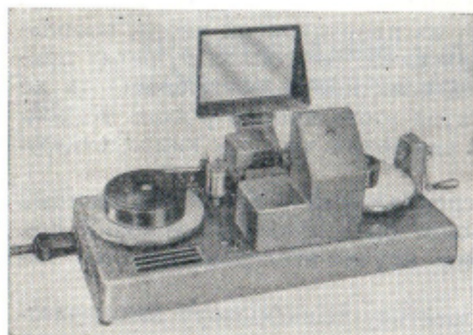


Рис. 19-1. Устройство для просмотра кинофильма

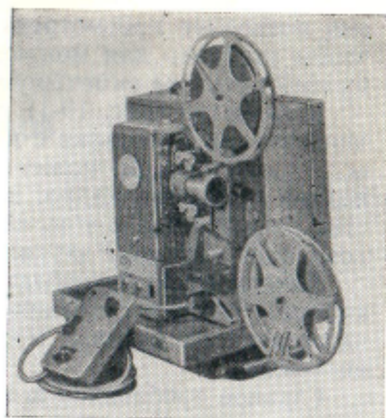


Рис. 19-2. Кинопроектор-дешифратор

2. Немерцающая замедленная кинопроекция с частотами 16, 12, 8, 6, 4, 2 и 1 *кадр/с*.
3. Проекция одиночных кадров.
4. Прямой и обратный ход.
5. Счетчик кадров при прямом и обратном ходе.
6. Дистанционное управление.

Несмотря на то, что в кинопроекторе-дешифраторе «Analyst» используется кинопроекционная лампа мощностью 750 *Вт*, кинопленка в кадровом окне не коробится и не повреждается даже при длительной проекции остановленного кадра.

Приборы для количественного анализирования кинофильмов. Простейшие измерительные работы и построение траекторий движущихся предметов по материалам киносъемки могут быть выполнены с помощью обычного фотоувеличителя.

Отдельные кадры проецируют на стол фотоувеличителя, к которому прикреплена белая чертежная бумага. Устанавливая каждый раз кадр в точно очерченную рамку или пользуясь неподвижными ориентирами, которые были специально для этого включены в объект съемки, при помощи остро заточенного карандаша отмечают точками последовательные положения или контуры снятого движущегося предмета. Отметки выполняются обычно не с каждого кадра, а через несколько кадров, например с каждого пятого кадра. В результате получают траекторию движущегося предмета и его положение на различных участках траектории.

Зная действительные размеры движущегося предмета, можно определить масштаб изображения и расстояния, проходимые предметом от кадра к кадру; если известны промежутки времени между моментами экспонирования последовательных кадров, то становится возможным определить скорость движения предмета на любом участке траектории, а также вычислить ускорения.



Рис. 19-3. Киноанализатор

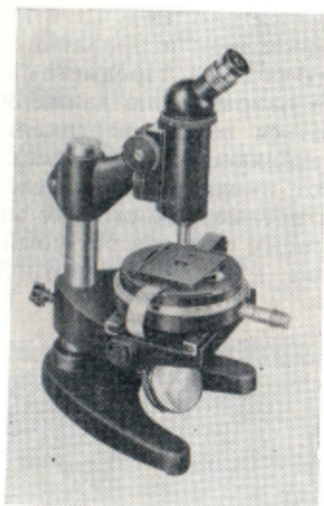


Рис. 19-4. Измерительный микроскоп для кинопленки

Вместо фотоувеличителя может быть использован диапроектор или аппарат для чтения микрофильмов.

Фотоувеличители для пленки малоформатных фотоаппаратов, как и аппараты для чтения микрофильмов, как правило, снабжаются объективами, дающими высокое качество изображения, что обеспечивает выполнение фотограмметрических работ с высокой точностью.

Киноанализатор. Более удобен для выполнения фотограмметрических работ специальный киноанализатор, представляющий собой стол, на котором смонтирован покадровый кинопроектор с просветным экраном и координатное измерительное устройство с линейками, имеющими деления (рис. 19-3). Матовый экран обычно заменяют прозрачным стеклом толщиной 4—5 *мм*, а поверх него накладывают лист кальки или пергамента, на которой легко наносить карандашом все необходимые метки.

Измерительный микроскоп для кинопленки при количественном анализе материалов научных киносъемок

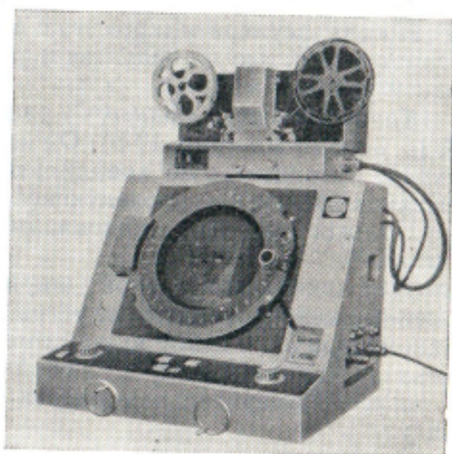


Рис. 19-5. Киноанализатор «Вангард»

показан на рис. 19-4. Штатив микроскопа допускает перемещения в вертикальном направлении и горизонтально относительно предметного столика. Предметный столик имеет движение, перпендикулярное направлению движения микроскопа, а также может поворачиваться вокруг вертикальной оси на 360°. Все кремальеры, осуществляющие перемещения тубуса микроскопа и предметного столика, имеют шкалы с делениями.

На предметном столике микроскопа имеется фильмовый канал с кадровым окном и 16-зубый барабан с пружинящим прижимным роликом, а также поворотной рукояткой для транспортирования

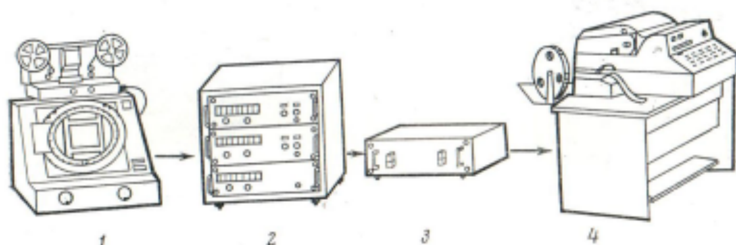


Рис. 19-6. Полный комплект киноанализатора «Вангард»:
1 — киноанализатор; 2 — счетно-решающее устройство с цифровыми индикаторами; 3 — система, управляющая электрической пишущей машинкой и перфоратором; 4 — пишущая машинка и перфоратор

кинопленки. Зубчатый барабан снабжен фиксатором, благодаря которому облегчается установка каждого следующего кадра кинофильма.

Микроскоп позволяет получать следующие увеличения:

56 крат — при поле зрения 2,25 *мм*,

42 крат — при поле зрения 3 *мм*,

21 крат — при поле зрения 6 *мм*,

14 крат — при поле зрения 9 *мм*.

Шкала окуляра-микрометра позволяет производить измерения длин с точностью до 0,001 *мм* и угловых величин — с точностью до одной угловой минуты.

Киноанализатор «Вангард» разработан для кинопленок шириной 8, 16, 35 и 70 *мм* (рис. 19-5). Он включает кинопроекционную часть, экран, измерительную координатную сетку и устройство для считывания записи для последующей обработки на ЭВМ.

Полный комплект киноанализатора «Вангард» показан на рис. 19-6.

Для кинопленок разной ширины (8, 16, 35 и 70 *мм*) имеются сменные кинопроекционные устройства. Предварительный просмотр киноматериала и отбор нужных мест, подлежащих количественному анализу, производится с любой частотой в пределах от 24 до 1 *кадр/с*. Измерительная работа выполняется при остановленном кадре.

Светооптическая система кинопроекционного устройства с лампой накаливания 200 *Вт* имеет воздушное охлаждение и снабжена

дополнительно теплопоглощающими светофильтрами. Поэтому при высокой яркости экрана и продолжительной проекции остановленного кадра кинопленка не коробится и не повреждается.

Изображение с 16-*мм* кинокадра имеет на экране увеличение 15 крат, с 35-*мм* кинокадра — 7 крат.

На экране имеется неподвижное (опорное) перекрестие. К экрану прилегает подвижный стеклянный диск диаметром 239 *мм*, на котором также имеется перекрестие, но в виде двух пар вертикальных и горизонтальных линий. По окружности диска имеются угловые деления. Передвижения измерительного перекрестия по вертикали и горизонтали кадра и повороты диска производятся с помощью вращающихся рукояток.

Любая точка на изображении кадра может быть принята за начало отсчета. После наведения подвижного перекрестия на точку нажатием на кнопку данные о ее положении автоматически вводятся в запоминающее устройство. Данные о расстояниях по осям X и Y и градусах угла F, а также номер кадра с помощью магнитной памяти и электронного счетно-решающего устройства преобразуются в устойчивые напряжения, пропорциональные значениям X, Y и F, и выдаются в цифровой форме индикаторами, которые либо могут быть просто считаны непосредственно, либо напечатаны электрической пишущей машинкой и пробиты на перфоленте или перфокартах.

Глава 20

КИНОСЪЕМКА ИЗОБРАЖЕНИЯ СО СВЕТЯЩИХСЯ ЭКРАНОВ

Киносъемка изображения с экрана телевизора. Трудности киносъемки изображения с экрана телевизора вызываются несовместимостью телевизионной и кинематографической систем.

Во-первых, нормальная частота киносъемки равна 24 кадрам в секунду, а частота передачи кадров в системе телевизионного вещания равна 25 кадрам в секунду. Кроме того, каждый телевизионный кадр состоит из двух полукадров.

При демонстрации на экран кинофильма, переснятого с телевизионного экрана с частотой 24 *кадр/с*, происходит некоторое, хотя практически малозаметное, увеличение скорости движения объектов и повышение тона звукового сопровождения.

Во-вторых, передача телевизионных полукадров происходит с очень короткими временны́ми промежутками, а на смену кадров в киноаппарате, когда обтюратор перекрывает кадровое окно, требуется значительно большее время.

При телевизионной передаче с частотой 25 *кадр/с* время воспроизведения одного телевизионного кадра составляет 40 *мс*. Время развертки на экране телевизора первого полукадра равно 18,4 *мс*, затем следует гашение электронного луча и его возвращение в начальное положение для развертки второго полукадра, это происходит в течение 1,6 *мс*. Развертка второго полукадра и возвращение электронного луча в исходное положение происходит в такое же время.

При киносъемке обычным киноаппаратом, в котором угол раскрытия обтюратора равен 170°, при частоте съемки 25 *кадр/с* экспонирование кинопленки происходит в течение 19 *мс*, а на продергивание кинопленки затрачивается 21 *мс*. Поэтому обычным киноаппаратом можно снимать только по одному полукадру от каждого телевизионного кадра, как показано на временно́й диаграмме (рис. 20-1). Для проведения такой киносъемки необходим только синхронный электродвигатель, обеспечивающий частоту съемки 25 *кадр/с*, и устройство для точного согласования момента начала экспонирования кинокадров с моментом начала развертки полукадров на телевизионном экране. Это осуществляется обычно поворо-

том статора синхронного электродвигателя, что вызывает изменение фазы вращения ротора.

При киносъемке телевизионного изображения через полукадр фиксируется лишь половина информации, потери сказываются в уменьшении разрешающей способности по вертикали и выявлении строчности изображения.

Устранение строчной структуры телевизионного изображения осуществляется путем придания электронному развертывающему лучу кинескопа вертикальных колебаний высокой частоты и малой амплитуды.

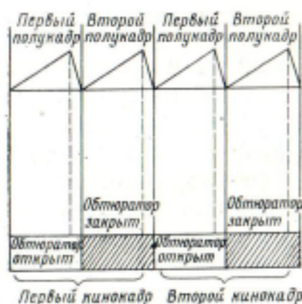


Рис. 20-1. Временна́я диаграмма процесса киносъемки экрана телевизора обычным киноаппаратом с углом раскрытия обтюратора 180°

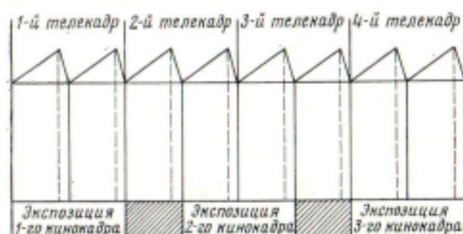


Рис. 20-2. Временна́я диаграмма процесса киносъемки изображения с экрана телевизора с конверсией одной трети телевизионных полукадров и одной трети кинокадров

В случае применения замкнутой телевизионной системы с построчной (а не чересстрочной) разверткой за счет расширения полосы частот пропускаемой телевизионной системой вдвое можно увеличить частоту развертки до 50 кадров и снимать обычным киноаппаратом через полукадр без потери информации.

Чересполукадровый способ киносъемки изображения с телевизионного экрана находит применение ввиду его простоты.

Имеется возможность сохранить разрешающую способность телевизионного изображения в каждом кинокадре за счет конверсии одной трети телевизионных полукадров и одной трети кинокадров.

Такая киносъемка должна производиться киноаппаратом с обтюратором, имеющим угол раскрытия обтюратора 240° (рис. 20-2). Первый и второй полукадры 1-го телевизионного кадра фиксируются на кинопленке полностью. После этого за время развертки первого полукадра 2-го телевизионного кадра происходит продергивание кинопленки в киноаппарате, когда кадровое окно перекрыто обтюратором. Затем следует съемка второго полукадра 2-го телевизионного кадра и первого полукадра 3-го телевизионного кадра и т. д. В результате получается кинофильм, снятый с частотой $16^2/_3$ *кадр/с*, в то время как частота смены телевизионных кадров равна 25. Этот способ используется в некоторых областях научной

киносъемки, в которых применяется телевизионная система и видеозапись, как, например, при ретнгенофлуорографической съемке по способу Делкаликс.

В США, где телевизионное вещание рассчитано на передачу 30 *кадр/с* (60 полукадров)*, применяют способ киносъемки телевизионного экрана с конверсией кадров с 30 до 24. Для этого применяется киносъемочный аппарат, угол раскрытия обтюратора в котором равен 288°; отношение времени экспозиции к времени прерывистого продергивания кинопленки в аппарате равно 4 : 1.

Ход экспонирования отдельных кадров при этом способе киносъемки показан на временно́й диаграмме (рис. 20-3). Первые два телевизионных полукадра фиксируются на 1-м кинокадре; затем обтюратор перекрывает кадровое окно, и 2-й кинокадр регистрирует вторую половину первого полукадра 2-го кадра, полностью второй полукадр и первую половину полукадра 3-го телевизионного кадра и т. д. согласно временно́й диаграмме. Таким образом из 30 телевизионных кадров получается 24 кинокадра. Киносъемка по этому способу ведется синхронно, но фазирование не обязательно.

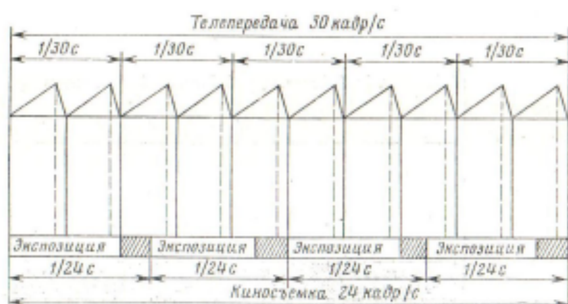


Рис. 20-3. Временна́я диаграмма процесса киносъемки экрана телевизора с конверсией 30 телевизионных кадров до 24 кинокадров

Научным сотрудником НИКФИ Н. И. Тельновым предложен способ киносъемки телевизионного изображения, основанный на использовании послесвечения экрана кинескопа. По этой системе киносъемка производится через полукадр нормальным киносъемочным аппаратом с углом раскрытия обтюратора 170° при полезном времени экспозиции 18,9 *мс*.

При использовании в кинескопе люминофора с послесвечением изображение одного полукадра, воспроизведенное развертывающим электронным лучом на экране телевизора, сохраняется некоторое время и фиксируется на кинопленку одновременно с вторым полукадром.

Вследствие конечного времени затухания люминофора отдельные элементы первого полукадра к началу экспонирования кинокадра имеют разную яркость. Наибольшая яркость соответствует части экрана, которая передается к концу развертки, а наименьшая — началу развертки полукадра. Развертка второго полукадра происходит в период, когда обтюратор открыт. Здесь также из-за того, что люминофор обладает послесвечением, экспозиция различных

* В США сеть переменного тока имеет частоту 60 *Гц*.

частей этого (второго) полукадра не будет одинаковой. Она будет больше для элементов, соответствующих началу развертки второго полукадра, и меньше — в конце развертки.

Для того чтобы сделать экспозицию всех частей первого и второго полукадров одинаковой, принимаются специальные меры: в цепь катод — модулятор кинескопа вводятся подсвечивающие импульсы, форма которых зависит от закона затухания люминофора. Подсвечивающий импульс для первого полукадра является убывающим, а для второго полукадра — возрастающим.

Полная фиксация телевизионных изображений на кинопленку производится киносъемочным аппаратом с быстрым продергиванием кинопленки за время обратного хода развертывающего электронного луча, которое не превышает 1,6 *мс*, выдержка при экспонировании каждого кинокадра должна быть 38,4 *мс*. Такой киноаппарат продергивает кинопленку почти в 12 раз быстрее, нежели это происходит в обычном киносъемочном аппарате.

Быстрое продергивание кинопленки осуществляется с помощью механизма прерывистого движения, объединяющего в себе грейфер и мальтийскую систему; при каждом шаге мальтийского креста грейфер совершает один цикл.

В киносъемочном аппарате для 16-*мм* кинопленки отечественного производства 16-СТ время продергивания кинопленки равно 3,3 *мс*, то есть оно больше, чем время, необходимое для смены телевизионного кадра, которое согласно телевизионному стандарту составляет 1,6 *мс*. Однако так как отношение ширины к высоте телевизионного экрана равно 1 : 1,33, а то же отношение в кинокадре на 16-*мм* кинопленке равно 1 : 1,35, имеется возможность снимать телевизионный экран полностью.

Отечественный киносъемочный аппарат для 35-*мм* кинопленки МИГ (модель 35КСТ) продергивает кинопленку за 2,8 *мс*.

В киносъемочном аппарате «Милликен» (США) быстрое продергивание 16-*мм* кинопленки осуществляется с помощью сжатого воздуха. Во время экспозиции кинопленка удерживается в фильмовом канале стопорным грейфером. После выхода грейфера из перфорации кинопленка под действием сжатого воздуха скачкообразно продвигается в предназначенное ей углубление, а грейфер снова входит в следующую перфорацию и стопорит кинопленку, а нижний зубчатый равномерно вращающийся барабан вытягивает кинопленку из углубления.

Быстрое скачкообразное продергивание кинопленки осуществляют также с помощью грейфера, который приводится в движение электромагнитом. На этом принципе работает 16-*мм* киносъемочный аппарат «Маркони» (Англия).

Киносъемка с экрана ЭОП и электронного усилителя яркости изображения. Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) дают возможность трансформировать изображение из одной спектральной области в другую, например из инфракрасной или ультрафиолетовой в видимую, а также усиливать яркость изображения.

Усиление яркости изображения на флуоресцирующем выходном экране ЭОПа достигается не только вследствие ускоряющего напряжения между катодом и анодами трубки, но и за счет значительного уменьшения электронного изображения с помощью электронной оптики. Поэтому изображение на выходном флуоресцирующем экране ЭОПа или усилителя яркости изображения получается весьма небольшим.

Обычный способ съемки мелкомасштабного объекта требует большого выдвижения объектива, что уменьшает относительное отверстие объектива или светосилу.

Репродуцирование на кинопленку изображения с маленького выходного экрана ЭОПа производят с помощью двух объективов,

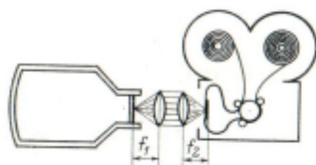


Рис. 20-4. Схема киносъемки мелкомасштабного изображения с выходного экрана ЭОПа

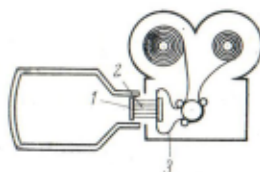


Рис. 20-5. Схема контактного способа киносъемки изображения с выходного экрана ЭОПа:
1 — выходной флуоресцирующий экран ЭОПа; *2* — стекловолоконный оптический элемент; *3* — кинопленка

поставленных лицевыми сторонами друг против друга (система тандем), как показано на рис. 20-4. Передний объектив ставят тыльной стороной к объекту съемки (выходному экрану ЭОПа), а второй — в нормальное положение; он должен быть наведен на ∞.

Если объект расположен точно на расстоянии f_1 переднего (перевернутого) объектива, то все выходящие из него лучи составят параллельный пучок. Тогда второй объектив, установленный нормально и сфокусированный на ∞, образует изображение объекта (экрана) в своей главной фокальной плоскости, сохранив светосилу.

Масштаб изображения при этом определяется формулой:

$$m = \frac{f_2}{f_1}. \qquad (20\text{-}1)$$

Когда используются одинаковые объективы ($f_1 = f_2$), масштаб изображения на кинопленке будет равен единице, объект будет изображен в натуральную величину.

При киносъемке в масштабе 1 : 1 оптическая система тандем позволяет увеличить использование излучения флуоресцирующего экрана в четыре раза. Изготовляются блоки из двух спаренных ультрасветосильных объективов, которые предназначаются для съемки экрана ЭОПа и усилителя яркости изображения.

Контактный способ киносъемки изображения со светящегося экрана. Для передачи изображения с флуоресцирующего экрана ЭОПа на кинопленку контактным способом применяется стекловолоконный оптический элемент (пластина), установленный в колбу вместо экранного стекла. К торцевой полированной плоскости стекловолоконной пластины, которая находится внутри колбы, приклеена тонкая пластинка из слюды для создания герметичности и поддержания вакуума. Непосредственно на поверхность этой пластинки нанесен слой люминофора. Кинопленка при экспонировании прижимается вплотную к противоположной также полированной торцевой стороне стекловолоконного элемента, и весь световой поток, попавший в стекловолокно от светящегося люминофора, передается на кинопленку (рис. 20-5).

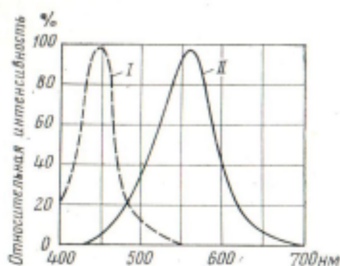


Рис. 20-6. Спектральные характеристики излучения двух люминофоров экрана электронно-лучевой трубки панорамного радиолокатора:

I — свечение внутреннего слоя; II — свечение внешнего слоя

Так как стекловолоконный оптический элемент находится в непосредственном контакте с кинопленкой, то киноаппарат не имеет объектива, фильмового канала и обтюратора. Заменой обтюратору служит электронный фотозатвор в виде дополнительных электродов в ЭОПе, которые запирают поток электронов при их движении к флуоресцирующему экрану на время продергивания кинопленки грейферным механизмом в киноаппарате.

В сравнении с обычным способом съемки экрана ЭОПа контактный способ значительно более эффективен в отношении использования излучения экрана. Разрешающая способность контактного способа определяется характеристиками стекловолоконного оптического элемента.

Контактный способ киносъемки светящихся экранов является новым и находится в стадии совершенствования. Многие авторы отмечают его перспективность. Известно применение этого способа для фотографирования и киносъемки телевизионного изображения с экрана кинескопа.

Киносъемка изображения с экрана панорамного радиолокатора. Изображение на экране электронно-лучевой трубки панорамного радиолокатора, образуемое в соответствии с вращением наружной антенны, радиальным штрихом может быть снято киноаппаратом с нормальной частотой 24 *кадр/с*.

Экран электронно-лучевой трубки панорамного радиолокатора имеет двухслойное покрытие светящимися составами двух типов. Внутренний слой люминофора, на который непосредственно воздействует электронный луч, обладает голубым свечением и очень коротким послесвечением. Второй слой, обращенный к наблюдате-

лю, возбуждается голубым светом первого слоя и флуоресцирует в желто-зеленой области спектра. Этот слой обладает длительным послесвечением. На рис. 20-6 приведены спектральные кривые излучения двух слоев, которыми покрыт экран электронно-лучевой трубки панорамного радиолокатора.

Для киносъемки представляет интерес лишь свечение желто-зеленого цвета, так как именно оно дает возможность видеть картину. Быстроперемещающаяся по экрану радиальная линия голубого цвета имеет лишь вспомогательное значение как возбудитель желто-зеленого свечения второго слоя с длительным послесвечением. Яркая голубая быстродвижущаяся радиальная линия мешает наблюдению картины, образующейся на всей поверхности экрана, поэтому яркость ее стараются понизить с помощью оранжевого светофильтра.

Для того чтобы произвести киносъемку изображения с экрана панорамного радиолокатора, необходимо использовать кинопленку, обладающую высокой светочувствительностью в пределах длин волн от 500 до 600 *нм*. Лучшим типом кинопленки для этих целей является кинопленка РФ или АС-1. Так как яркость экрана, покрытого оранжевым светофильтром, чрезвычайно мала, требуется применение светосильного или ультрасветосильного объектива, а также киноаппарата по возможности с большим раскрытием обтюратора.

Для регистрации изображения с экрана панорамного радиолокатора применяют также замедленную покадровую киносъемку. При этом способе экспонирование происходит в течение всего цикла вращения развертывающего луча, которое может быть равно 3—4 *с*. Затем кинопленка быстро продергивается при закрытом обтюраторе и далее следует экспонирование последующего кадра.

Покадровая киносъемка производится аппаратом РФК-1М (для 16-*мм* кинопленки) или РФК-5 (для 35-*мм* кинопленки). Срабатывание лентопротяжного механизма и обтюратора аппарата происходит от электрических импульсов, поступающих от вращающейся антенны или электронного устройства, связанного с электрической схемой радиолокатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая книга по своему содержанию представляет собой только введение в технику научно-исследовательской киносъемки, поскольку более подробное рассмотрение технологии и использования специальных киносъемок в различных областях науки потребовало бы значительного увеличения объема издания.

Для более глубокого ознакомления с определенными видами специальных киносъемок рекомендована дополнительная литература; перечень основных работ дан в конце книги. Новейшие достижения техники научной кинематографии находят отражение на страницах как отечественных, так и зарубежных периодических изданий.

Техника специальных киносъемок быстро развивается. С каждым годом совершенствуются модели киносъемочных аппаратов, объективов, появляются новые светочувствительные материалы.

Особый прогресс за последние годы достигнут в области новых эффективных источников освещения, электронных приборов, электрооптических преобразователях и др. На их базе совершенствуются известные и развиваются новые способы киносъемки.

Важное значение в процессе киносъемки приобретают электронное усиление яркости изображения, телевизионное сканирование изображения и видеозапись на магнитную ленту. Все шире применяются автоматические системы регулирования экспозиции, фокусировки объектива, синхронизации съемки с моментом возникновения изучаемой фазы явления или процесса, дистанционного управления киносъемочным аппаратом и т. д.

Каждая только из перечисленных проблем представляет, по существу, вполне самостоятельный раздел специальной киносъемки, который в будущем может быть изложен в виде отдельного издания.

В этой же книге даны лишь основы техники, которые нужны лицам, начинающим заниматься применением специальных киносъемок в науке и технике.

Кинематография как универсальный метод регистрации разнообразных явлений завоевывает все новые и новые области в науке, технике, искусстве. Можно вполне определенно говорить, что почти все наиболее значительные открытия и достижения современности в той или иной мере связаны с использованием фотографических или кинематографических методов исследования.

Эффективному применению и совершенствованию кинопроцессов может оказать существенную помощь пособие, рассчитанное на инженерно-технических и научных работников, использующих специальные киносъемки как метод исследования.

Автор стремился помочь читателям получить общее представление о широких возможностях применения специальных киносъемок в самых различных областях.

Если эта книга поможет читателям, то автор будет считать свою задачу выполненной.

ЛИТЕРАТУРА

К 1 главе

Лаврентьев В. И., Пелль В. Г. Скоростная киносъемка камерой СКС-1. М., «Искусство», 1963.

Саламандра Г. Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов. М., «Наука», 1974.

Сахаров А. А. Высокоскоростная киносъемочная аппаратура с прерывистым движением пленки. Научно-технический сборник «Кинотехника». М., изд. НИКФИ, 1963.

Сицинская Г. И., Капел А. А. Современное состояние высокоскоростной киносъемочной аппаратуры с непрерывным движением кинопленки и призменной компенсацией. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1970, № 4, с. 305—313.

Тарантов Е., Цветаев Ю. О времени экспонирования в скоростных съемочных камерах с призменной компенсацией. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1960, № 4, с. 280.

Рыбаков Ю. С., Яковлев В. А. Универсальная система синхронизации, дистанционного управления и контроля работы кинокамеры с подвижной пленкой. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1971, № 6, с. 404—410.

Лаврентьев В. И., Подвальный С. П. Определение оптимальной частоты смены кадров при высокоскоростной киносъемке. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1961, № 9.

Ко 2 главе

Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М., «Наука», 1964.

Высокоскоростная фотография и кинематография. — «Успехи науч. фотогр.», т. 9. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1964.

Всесоюзная научно-техническая конференция «Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстропротекающих процессов. Тезисы докладов (Москва, 26—30 ноября 1972 г.). М., изд. ВНИИОФИ, 1972.

Физика быстропротекающих процессов. Пер. с нем. Под ред. Н. А. Златина, т. 1. М., «Мир», 1971.

Гребенников О. Ф. Киносъемочная аппаратура. Л., «Машиностроение», 1971.

Гребенников О. Ф., Гусев В. П., Дубовик А. С., Проворнов С. М., Сицинская Н. М. Современное состояние высокоскоростной растровой фотографии.— «Техника кино и телевидения», 1971, № 12, с. 18—23.

К 3 главе

Куликович Б. Ю. Многокамерная цейтраферная съемка.— «Техника кино и телевидения», 1969, № 8, с. 47—51.

Анникаве К. Н. Автоматическое устройство для цейтраферной съемки.— «Техника кино и телевидения», 1976, с. 67—68.

Вейдель Г. Цейтрафер для научной кинематографии.— «Йенское обозрение», 1959, № 5.

Устройство для замедленной киносъемки.— «Радио», 1973, № 8. с. 61.

Похитонов Ю. П. Использование покадрового двигателя К-24-5 для центраферной киносъемки.— «Техника кино и телевидения», 1975, № 7, с. 68—69.

Дубинский В. А. Применение метода замедленной киносъемки для анализа трудовых и технологических процессов.— В кн.: Техника киносъемки, ее применение в промышленных и научных исследованиях (Материалы семинара), т. 2, изд. Моск. Дома науч.-техн. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1966, с. 20—24.

К 4 главе

Миненков И. Б. Макрофотография. М., «Искусство». 1960.

Миненков И. Б. Некоторые вопросы макрофотосъемки.— «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1956, № 6, с. 446—454.

Кудряшов Н. Н. Специальные виды фотосъемки. М., «Искусство», 1955.

Ардашников Б. М. Новые возможности объективов с переменным фокусным расстоянием.— «Техника кино и телевидения», 1976, № 3, с. 13—16.

Шпякин М. Г. Фокусировка панкратических объективов на малые дистанции» — «Оптико-мех. пром-сть», 1972, № 11.

Кудряшов А. Н. Практика макрокиносъемки.— «Техника кино и телевидения», 1977, № 12, с. 26—31.

К 5 главе

Федин Л. А., Барский И. Я. Микрофотография. Л., «Наука», 1971.

Скворцов Г. Е., Панов В. Я., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы. Л., «Машиностроение», 1969.

Кравченко А. Т., Милютин В. Н., Гудима О. С. Микрокиносъемка в биологии. М., Гос. изд-во мед. лит., 1963.

Франсон М. Фазовоконтрастный и интерференционный микроскопы. М., изд Г.ИТТЛ, 1960.

Апельт Г. Введение в методы микроскопического исследования. М., Медгиз, 1959.

Новгородцев В. М. Установка для микросъемок в научно-популярных фильмах. — «Техника кино и телевидения», 1969, № 11, с. 73—75.

Вейдель Г. Экспонометр-автомат для микрофотографии с помощью насадочной камеры. — «Йенское обозрение», т. 2, 1963, с. 104—108.

Романов Н. С. Микросъемка с увеличенной глубиной резкости. — «Природа», 1955, № 9, с. 87—88.

Техника электронной микроскопии. Под ред. Д. Кея. М., «Мир», 1965.

Фихте Б. А., Печников Н. В., Будницкий А. А., Корн М. Я. Кинематографические методы исследования микроорганизмов. М., «Наука», 1975.

Бергер, Гельбке, Мелисс. Практическая микрофотография. Пер. с нем. М., «Мир», 1977.

К 6 главе

Соловьев С. М. Инфракрасная фотография. М., «Искусство», 1960.

Соловьев С. М. Фотографирование в инфракрасных лучах. М., «Искусство», 1957.

Анго М. А. Инфракрасное излучение. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.

Марголин И. А., Румянцев Н. П. Основы инфракрасной техники. М., Воениздат, 1957.

Леконт Ж. Инфракрасное излучение. М., изд. ГИФМЛ, 1958.

Соловьев С. М. Рецепт гиперсенсибилизирующего раствора для инфрахроматических пленок. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1958, № 3, с. 223—224.

Соловьев С. М., Парфенова Н. М. Способ повышения стабильности гиперсенсибилизированных инфрахроматических пленок. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1958, № 3, с. 285.

Щадронов Б. В. Исследование свойств ЭОПа ВЭИ-3 для киносъемки в инфракрасных лучах. — «Техника кино и телевидения», 1971, № 7, с. 14—19.

Щадронов Б. В. Киносъемка в инфракрасных лучах с применением ЭОПов. — «Техника кино и телевидения», 1969, № 8, с. 80.

К 7 главе

Мейер А., Зейтц А. Ультрафиолетовое излучение. М., Изд-во иностр. лит., 1952.

Шифферс Л. А., Иоффе В. А. Сравнение источников ультрафиолетового излучения, применяемых в микроскопии — «Оптико-мех. пром-сть», 1973, № 4, с. 12—15.

Стеханов А. И. Кристаллические светофильтры для ультрафиолетовых областей спектра. — «ЖТФ», 1953, № 3.

Кравченко А. В., Морозова Н. Г., Старцев Г. П. Абсолютная спектральная чувствительность фотоматериалов ГосНИИ химфотопроекта для регистрации коротковолнового ультрафиолетового излучения. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1970, № 3, с. 161—166.

К 8 главе

Дмоховский В. В. Основы рентгенотехники. М., Медгиз, 1960.

Дмоховский В. В. Физико-технические основы флюорографии.— В кн.: Основы флюорографии. М., «Медицина», 1960, с. 11—79.

Рабкин И. Х., Ермаков Н. П. Электронно-оптическое усиление, рентгенотелевидение, рентгенокинематография. М., «Медицина», 1969.

Целлнер Г. Ультрасветосильные объективы и границы их применения. — «Йенский ежегодник», 1962, с. 68—73.

Дизец Ф. Новый рентгеновский объектив 0,73/100. — «Йенское обозрение», 1964, № 1, с. 83—84.

Гарнов В. В., Федин Е. Д. Высокоскоростная рентгеновская стереосъемка. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1965, № 2, с. 124—131.

К 9 главе

Живандров Н. Д. Поляризация света. М., «Наука», 1969.

Финк К., Рорбах К. Измерение напряжений и деформаций. М., Машгиз, 1962.

Александров А. Я. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, изд. ЛГУ, 1966.

Козловский С. С., Ульянов В. Д. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, изд. ЛГУ, 1966.

Ахметзяров М. Х. Исследование концентрации напряжений в пластической области при помощи фотоупругих покрытий. — «Известия АН СССР». ОТН. «Механика и машиностроение», 1963, № 1, с. 159—162.

Федоров А. П. Применение метода оптически активных покрытий для исследования упруго-пластического поведения элементов судовых конструкций. — «НТО судостроительной пром-сти», вып. 53, 1964.

Хесин Г. Л., Костин И. Х., Славин О. К., Шляпкин В. Н. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, изд. ЛГУ, 1966.

Малышев Л. К. Использование скоростного фоторегистратора СФР при исследовании распространения волн напряжения методом фотоупругости. — «Успехи науч. фотогр.», т. 9, 1964, с. 258—261.

Федоров А. П. Применение высокоскоростной кинокамеры СФР при исследовании методом оптически активных покрытий распространения волн напряжений в металлических моделях. — «Успехи науч. фотогр.», т. 9, 1964, с. 249—253.

Малышев Л. К. Особенности высокоскоростной киносъемки камерой СФР при исследованиях методом динамической фотоупругости. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1965, вып. 4, с. 276—278.

Малышев Л. К., Пантелеев А. А. Кинематографическое исследование быстропротекающих процессов с помощью поляризационного света. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1970, вып. 1, с. 31—36.

К 10 главе

Абруков С. А. Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей, изд. Казанского ун-та, 1962.

Васильев Л. А. Теневые методы. М., «Наука», 1968.

Холдер Д., Норт Р. Теневые методы в аэродинамике. М., «Мир», 1966.

Саламандра Г. Д. Высокоскоростные съемки шлирен-методом. М., «Наука», 1965.

Физика быстропротекающих процессов. Под ред. К. Фоллрата и Г. Томера. М., «Мир», 1971.

Тарантов Е. А. К расчету оптической системы для соединения высокоскоростных киносъемочных камер с теневыми и интерференционными приборами». — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1959, вып. 5, с. 375—379.

Саламандра Г. Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов». М., «Наука», 1974.

Анашев М. Д., Михайленко В. Д., Беляева И. Ф. Применение цветного растра для количественных исследований шлир оптическим методом Теплера. — «Труды Ин-та двигателей», вып. 6, 1962, с. 161—165.

К 11 главе

Соул Х. В. Электронно-оптическое фотографирование. М., Воениздат, 1972.

Семенов Е. П. Электронно-оптические усилители яркости изображения. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1963, № 5, 385—399.

Бутслов М. М., Степанов Б. М. Новые ЭОПы и усилители света для научных исследований. М., Труды ВНИИОФИ, 1972.

Шеберстов В. И. Увеличение практически используемой светочувствительности в процессах обработки экспонированных фотографических слоев. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1956, № 4, с. 295—299.

Халфин А. М. Электронное усиление изображений. — «Техника кино и телевидения», 1958, № 9, с. 10—19.

К 14 главе

Капани Н. С. Волоконная оптика. Принципы и применения. М., «Мир», 1969.

Вейнберг В. Б., Саттаров Д. К. Оптика световодов. Л., «Машиностроение», 1969.

Барченков С. А. Чудесные волокна. М., Воениздат, 1969.

Световоды для передачи изображения. Зарубежная информация. Под ред. К. И. Блоха и В. Б. Вейнберга. М., изд. Центр. ин-та информации легкой пром-сти, 1959 и 1961.

Гольдштейн А. Г. Новое визирное устройство киносъемочной камеры. — «Техника кино и телевидения», 1965, № 10, с. 35—37.

Вейнберг В. Б., Саттаров Д. К. Волоконная оптика в инженерно-промышленной и скоростной фотографии и кинематографии. — В кн.: Техника киносъемок, ее применение в промышленности и научных исследованиях (Материалы семинара), т. 1,

изд. Моск. Дома науч.-техн. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1966, с. 70—84.

Рождественский Ю. В., Ромаданова А. П. Применение систем с гибкими световодами для кинофотосъемок оптическими методами, в сборнике «Техника киносъемок, ее применение в промышленности и научных исследованиях» (Материалы семинара), т. 1, изд. Моск. Дома науч.-техн. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1966, с. 85—91.

Щадронов Б. В., Карасев Ю. А. Контактный метод съемки с ЭОП. — «Техника кино и телевидения», 1974, № 12, с. 34—36.

К 18 главе

Амириди В. Ф. Киносъемка телевизионных изображений с экрана кинескопа. М., изд. Гос. комитета СМ СССР по радиовещанию и телевидению, 1963.

Бургов В. А. Кинотелевизионная техника. М., «Искусство», 1964.

Гольдин А. А. О методах записи цветных телевизионных программ на кинопленку. — «Техника кино и телевидения», 1961, № 1.

Киносъемочный аппарат «МИГ» (35 КСТ). — «Техника кино и телевидения», 1969, № 8, с. 80.

Щадронов Б. В. Киносъемка в инфракрасных лучах с применением ЭОПов. — «Техника кино и телевидения», 1969, № 8, с. 52—55.

Попов П. Ф., Семенов Е. Ф. Фотографирование ТВ изображения с ЭЛТ со стекловолоконной планшайбой. — «Техника кино и телевидения», 1973, № 12, с. 48—50.

Тельнов Н. И. Семенов В. М. Аппаратура записи ТВ-изображения с экрана кинескопа на кинопленку. — «Техника кино и телевидения», 1973, № 9, с. 30—36.

Высоцкий М. З. Способы перевода изображений с магнитной ленты на кинопленку. — «Техника кино и телевидения», 1975, № 2, с. 70—76.

К 19 главе

Русинов М. М. Инженерная фотограмметрия. М., «Недра», 1966.

Коншин М. Д. Инженерная фотограмметрия. М., «Недра», 1967.

Свиридов А. С. Стереофотограмметрия. М., Геодезиздат, 1951.

К 20 главе

Сонько В. Н. Аналитическое дешифрирование материалов измерительной кинофотосъемки. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1974, № 4, с. 248—254.

Первеева З. В. Дешифрирование при измерительной кинофотосъемке в науке и технике. — В кн.: Техника киносъемок, ее применение в промышленности и научных исследованиях, изд. Моск. Дома науч.-техн. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1966.

Негодаев М. Н. Об аналитической связи между параметрами киносъемки и относительными случайными погрешностями результата и непосредственных измерений. М., изд. ВНИИОФИ, 1972, 199—202.

Петрунина И. Д., Подвальный С. П., Рыбакевич Э. И. Исследование ошибок времени в научных метрических киносъемках. М., изд. ВНИИОФИ, 1972, с. 112—113.

Васнецович В. В., Подвальный С. П., Рыбакевич Э. И. Исследование величин ошибок линейных измерений и необходимой частоты смены кадров при киносъемке объективов, движущихся в трехмерном пространстве. М., изд. ВНИИОФИ, 1972. с. 114—115.

Первеева З. В. Дешифрирование съемки с наклонным базисом.— В кн.: Промышленная высокоскоростная фотография и кинематография и их применение в науке и технике (Материалы семинара), изд. Моск. Дома науч.-техн. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1967.

Кукибный А. А. Об определении точности количественной обработки кинофильма — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1961 № 2, с. 202—207.

Тарантов Е. А. О точности измерений, проводимых методами скоростной киносъемки. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1960, № 1, с. 15—19.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Кудряшов Н. Н.

К88 Специальные киносъемки. — М., Искусство, 1978. — 286 с., ил.

К специальным киносъемкам относятся скоростные и высокоскоростные, замедленные, покадровые и цейтраферные съемки, киносъемки через микроскоп, макросъемки, съемки в инфракрасных, ультрафиолетовых и других невидимых лучах, подводные съемки, съемки в оптически неоднородных средах и т. п. Книга знакомит с аппаратурой и методикой проведения специальных киносъемок. Рассчитана на работников кино- и телестудий, а также на многочисленных работников исследовательских учреждений, применяющих киносъемки в своей работе.

ББК 37.95
778

К $\frac{32303\text{-}042}{025(01)\text{-}79}$ 135-78

Николай Николаевич Кудряшов

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КИНОСЪЕМКИ

Редактор Н. Д. Панфилов
Художник П. Н. Федоров
Художественный редактор Э. Э. Ринчино
Технический редактор Е. Я. Рейзман
Корректоры З. П. Соколова и Г. И. Сопова

И. Б. № 591

Сдано в набор 11.04.78. Подписано к печати 19.04.79. А04617. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. п. л. 18. Уч.-изд. л. 17,619. Изд. № 16687. Тираж 20 000. Заказ 654. Цена 1 р. 50 к. Издательство «Искусство», 103009 Москва, Собиновский пер., 3. Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

1 р. 50 к.